This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

**Usage guidelines**

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

**About Google Book Search**

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

BIBLIOTHECA · BODLEIANA ·

H. W. Dove

# DARSTELLUNG

DER

# FARBENLEHRE

UND

# OPTISCHE STUDIEN

VON

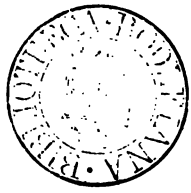
H. W. Dove.

MIT ZWEI LITHOGRAPHIRTEN TAFELN.

ENGLISCHE UEBERSETZUNG VORBEHALTEN.

BERLIN.
Verlag von G. W. F. Müller.
1853.

115. a. 3.



# VORREDE.

Ich bin so häufig aufgefordert worden, die von mir im Jahre 1836 veröffentlichte Darstellung der neuern Farbenlehre, da sie ganz vergriffen, wiederum herauszugeben, dafs ich diesem Wunsche hiermit entspreche. Der Abdruck ist kein unveränderter, da neuere Untersuchungen einige Gebiete der Optik in der Zwischenzeit dem Verständnifs wesentlich näher geführt haben, und es sich nicht entschuldigen liefse, auf indirecte Beweise zurückzugehen, wo es gelungen ist, durch directe Versuche die Grundlagen der Wellentheorie zu befestigen. Die populäre Darstellung eines so reichen Gebietes von Erscheinungen, als wie sie die Farbenlehre darbietet, ist so schwierig, dafs ich nicht hoffen darf, diese Schwierigkeiten vollständig überwunden zu haben. Ich mufs daher auf die Nachsicht der Leser rechnen, wie sie mir bei ähnlichen Bemühungen in Beziehung auf Meteorologie, Akustik und Elektricitätslehre zu Theil geworden ist. Die Berücksichtigung der von Goethe gegen die Newton'sche Vorstellung über die Natur des Weifs erhobenen Einwürfe wird manchen jetzt als unnöthig erscheinen, da diese Bedenken als vollkommen beseitigt anzu-

sehen seien. Dennoch habe ich sie unverändert aus dem ersten Abdruck aufgenommen, da die Geschichte der Wissenschaft zeigt, dafs der consequenten Ableitung der optischen Erscheinungen aus den Principien der Wellentheorie gegenüber es zu allen Zeiten nicht an solchen fehlen wird, für welche der Pater Castel eine gröfsere Autorität ist als Huyghens, Newton, Fresnel und Frauenhofer.

Im zweiten Theile dieser Schrift habe ich die optischen Untersuchungen zusammengestellt, welche ich seit einer Reihe von Jahren in physikalischen Zeitschriften veröffentlicht habe. Sie beziehen sich auf Stereoskopie, Polarisation des Lichtes und subjective Farben. Da der von mir angegebene Polarisationsapparat sich in den Händen vieler Physiker befindet und auch jetzt noch besonders von Herrn Langhoff in Berlin vielfach angefertigt wird, so habe ich geglaubt, dafs eine genaue Beschreibung seiner Anwendung zur Darstellung der Polarisationserscheinungen manchen erwünscht sein werde. Dasselbe hoffe ich von den chromatischen Versuchen mit dem Stereoskop und der Hervorrufung des Glanzes aus der binocularen Combination nicht glänzender Flächen, so wie von den Apparaten, durch welche die subjectiven Farben in auffallender Intensität erregt werden. Dieser zweite Theil dient zu gleicher Zeit zur Ergänzung des ersten, in welchem auf Einzelnheiten nicht eingegangen werden konnte.

Berlin, 10. Mai 1853.

DOVE.

# INHALT.

## Farbenlehre.


### 1. Historische Einleitung p. 1—16.

Fortpflanzung des Lichtes augenblicklich nach Cartesius p. 1, eine Zeit dauernd nach Römer p. 3, nach Bradley p. 4. Art der Fortpflanzung wellenförmig nach Huyghens und Euler p. 6 u. 7. Emanationssystem von Newton p. 7. Beugung nicht durch Anziehung hervorgerufen p. 8 — 10. Brechung ebensowenig p. 10 — 12. Anerkennung der Wellentheorie p. 13 u. 14. Goethe's Farbenlehre p. 15.

### 2. Eintheilung der Körper in Beziehung auf das Licht p. 16—19.

Leuchtende und dunkle p. 16, durchsichtige und undurchsichtige p. 17, weifse, schwarze, farbige, graue p. 18. Polarisation und Depolarisation p. 19.

### 3. Eintheilung der Farben p. 20—56.

Physische und physiologische, permanente und apparente p. 20, prismatische p. 20, durch Interferenz p. 21, durch Absorption p. 22, homogene p. 23—29. Ergänzungsfarben p. 30. Grundfarben p. 30—33. Gemischte p. 33 — 39. Newton'sche Ringe in homogener Beleuchtung p. 40 — 43. Farbenfolge in weifser p. 45. Anwandlungon p. 46. Interferenz, beobachtet von Grimaldi p. 47; erläutert von Young p. 48. Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Anwandlung p. 49. Farbenringe, erklärt von Hooke p. 51. Spiegelversuch von Fres-

nel p. 52. Dicke Platten p. 54. Gitter p. 55. Interferenz des polarisirten Lichtes p. 56.

4. Nähere Bestimmungen der Interferenz p. 57—99.

Analogien aus dem Gebiet der Akustik p. 57 — 66. Dauer des Lichteindrucks p. 67. Nachwirkung p. 69 — 73. Unterschied in der Entwickelung der Optik und Akustik p. 74. Bestimmung der Wellenlänge in beiden Gebieten p. 74; für das Licht p. 75 — 77. Zusammenhang der Wellenlänge mit dem Brechungsverhältnifs p. 77. Grundbedingung für die Bewegung des Lichtes in ein und in zwei Medien p. 78 u. 79; langsamere Bewegung im stärker brechenden Mittel nach Foucault und Fizeau p. 80 — 86; gleich für alle Farben im leeren Raume p. 86 u. 87. Anzahl der Wellen in gegebener Zeit p. 88 u. 89. Vergleichung mit den Schallschwingungen p. 96 — 99.

5. Gründe, dafs die Lichtschwingungen transversal p. 94—135.

Entdeckung der Polarisation p. 94. Apparate p. 96 — 99. Unterscheidung polarisirten und unpolarisirten Lichtes p. 100 — 102. Polarisationsebene p. 102. Drehung derselben p. 104 — 107. Depolarisation p. 107. Eintheilung doppelbrechender Krystalle p. 109. Künstliche Erzeugung der Doppelbrechung p. 110 u. 111. Wellenfläche p. 113. Polarisationsfarben p. 114. Ableitung derselben p. 118 bis 123. Circulare und elliptische Polarisation p. 124 — 132. Erscheinungen im Bergkrystall p. 133; in Flüssigkeiten p. 134; elliptische Polarisation auf Metallen p. 135.

6. Abhängigkeit des Farbeneindrucks von der Wellenlänge p. 136—149.

Newton's Entdeckung p. 136; experimentelle Bestätigung p. 139; durch Frauenhofer p. 140; experimentum crucis p. 141. Goethe's Ableitung der prismatischen Farben p. 143. Achromasie p. 146. Definition des Weifs p. 147. Zerstreuung p. 149.

7. Absorptionsfarben p. 151—157.

Verschiedene Durchsichtigkeit für verschiedene Farben p. 151. Opalescenz p. 152; dioptrische und katoptrische Absorption p. 152.

Dichroismus p. 153. Entstehung der Linien im Gasspectrum p. 154. Nachwirkung der Farbe auf die Netzhaut p. 157.

# Optische Untersuchungen.

## I. Stereoskopische Versuche p. 161—190.

Theorie des Binocularsehens p. 161 — 163. Stereoskopische Erscheinungen ohne Anwendung eines Instruments p. 164; cyclopisches Sehen p. 164. Erscheinungen am Hohlspiegel p. 165; convexe Reliefe erscheinen niedriger als concave p. 165. Combination weifser und schwarzer und verschieden gefärbter Bilder im Stereoskop p. 166. Nichtachromasie des Auges p. 174. Entstehung des Glanzes p. 177. Ableitung der Irradiation p. 178. Die flatternden Herzen p. 182. Einflufs der Helligkeit einer weifsen Beleuchtung auf die relative Intensität verschiedener Farben p. 183 — 189. Mangelnder Farbensinn p. 189 — 190.

## II. Stereoskopische Apparate p. 190—201.

Das Spiegelprisma p. 190 — 192. Prismenstereoskop, bestehend aus einem Prisma und einer Zeichnung p. 193, aus zwei Prismen und zwei Zeichnungen p. 193, aus einem Prisma und zwei Zeichnungen p. 195. Fernrohrstereoskop p. 196. Spiegelstereoskop für zwei Bilder mit einem Metallspiegel oder Ablesungsprisma p. 196. Stereoskop durch Doppelbrechung p. 197. Das Reversionsprisma p. 197 — 199. Stereoskop daraus p. 199. Reversionsfernrohr p. 199 — 201.

## III. Polarisation des Lichtes p. 202—223.

Apparat für geradlinige, elliptische und circulare Polarisation p. 202—213. Erscheinungen im rotirenden Apparate p. 213. Darstellung des Weifs durch Uebereinanderlegen complementarer Bilder p. 219, durch Uebereinanderlegen objectiver und subjectiver Farben p. 223. Darstellung des Grau durch Absorption vermittelst farbiger Gläser p. 223.

## IV. Circularpolarisation des Lichtes p. 224—273.

Darstellung desselben durch gepreſste Gläser p. 224 — 228, durch gekühlte Gläser p. 228 — 230. Erscheinungen während des Erhitzens

und Abkühlens p. 230 — 233. Erscheinungen in verschiedenen Farben des Spectrums p. 233. Farbenerscheinungen combinirter Krystalle im weifsen Licht p. 235, in Zwillingen p. 236. Circularpolarisation durch schwingende Klangscheiben p. 238. Unterschied zwischen Erwärmung und Abkühlung p. 238. Erscheinungen gekühlter und gepreſster Gläser im circularen Licht p. 239. Elliptische Polarisation durch das Reversionsprisma p. 240. Unterscheidung positiver und negativer Krystalle im circularen und elliptischen Licht p. 242 — 247. Zusammenhang der optischen Eigenschaften der Bergkrystalle mit ihren äufsern krystallographischen Kennzeichen p. 247 — 260. Depolarisation des Lichtes p. 260. Absorption des polarisirten Lichtes in doppelbrechenden Krystallen als Unterscheidungsmittel ein- und zweiachsiger Krystalle p. 262—268. Methode, diese Absorption zu messen p. 269—273.

V. Versuche über subjective Farben p. 274—281.

Doppelbilder auf farbigen Gläsern p. 274 — 278. Subjective Farbenerscheinungen bei einem Farbenkreisel p. 278 — 281. Scheiben zur Darstellung subjectiver Farben p. 281.

VI. Einzelne optische Notizen p. 283—287.

Versuche über Gitterfarben in Beziehung auf kleinere Höfe p. 283 bis 286. Stephanoskop p. 286. Optische Täuschung auf der Eisenbahn p. 287. Methode, die Absorption des Lichtes in farbigen Flüssigkeiten zu bestimmen p. 287.

# Die neuere Farbenlehre

mit

andern chromatischen Theorieen

verglichen.

Als Olav Römer [1]) am 9. November des Jahres 1676 die Bemerkung machte, dafs man die regelmäfsig wiederkehrenden Verfinsterungen der Jupitersmonde eine Viertelstunde später wahrnehme, wenn die Sonne zwischen Jupiter und Erde steht, als zu der Zeit, wo beide Planeten sich auf derselben Seite der Sonne befinden, mufste die bisherige Ansicht aufgegeben werden, dafs die Vermittelung zwischen einem leuchtenden und einem beleuchteten Körper eine augenblickliche sei, ein wie bedeutender Raum auch beide trenne. Es fiel demnach die Vorstellung weg, welche Descartes [2]) sich darüber gebildet hatte. »Wenn man im Finstern mit einem Stocke geht, sagt er, so fühlt man in der Hand augenblicklich, wenn die Spitze des Stockes an einen Gegenstand stöfst. Dies wird das Fremdartige erklären, dafs das Licht in einem Augenblicke von der Sonne zu uns gelangt. Denn um eine Vergleichung zu ziehen, setzt er hinzu, wünsche ich, dafs du glaubst, das Licht sei nichts anderes in den Körpern, welche leuchtend heifsen, als eine sehr

[1]) Démonstration touchant le mouvement de la lumière. Mém. de Paris 1. p. 214. u. 10. p. 575.

[2]) Dioptrique 1. 5.

rasche und sehr lebhafte Bewegung, welche durch Vermittelung der Luft und der andern durchsichtigen Körper auf eben die Art zu den Augen gelangt, wie die Bewegung oder der Widerstand der Körper, welchen jener Blinde begegnet, in die Hand gelangt durch Vermittelung des Stockes, und dies wird augenblicklich (?) sein, wäre auch der Zwischenraum gröfser, als von der Erde zum Himmel. Es ist daher nicht nöthig, dafs etwas Materielles von den Objecten zu unserm Auge gelange, so wie nichts von den Körpern, welche der Blinde fühlt, in seine Hand kommt.« Bradley's Entdeckung der Aberration[1]) am 20. December 1725 zeigte, dafs das directe Licht der Fixsterne sich genau mit derselben Geschwindigkeit bewege, wie das reflectirte Sonnenlicht der Jupitersmonde. Aus der Verfinsterung derselben folgt nämlich, dafs das Licht den Zwischenraum zwischen Sonne und Erde d. h. den Raum von 20,682329 Meilen in 493,19 Secunden durchläuft, also 41935 Meilen in einer Secunde sich fortbewegt. Die Geschwindigkeit des Lichtes verhält sich demnach zu der Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn, wie der Halbmesser eines Kreises zu dem Bogen von 20½ Secunde. Dies ist aber die sogenannte Aberrationsconstante d. h. der Halbmesser des Kreises, welchen Sterne am Pole der Ekliptik im Verlaufe eines Jahres um ihren wahren Ort zu beschreiben scheinen. Da wir nun wegen der Bewegung der Erde das Fernrohr um die vorher angegebene Anzahl Secunden vorneigen müssen, wenn wir das Licht, welches ein solcher Stern uns zusendet, in demselben richtig auffangen wollen, so erscheint der Stern uns um so viel gegen den Punkt der Ekliptik, auf welchen zu

[1]) Philos. Trans. abridg. vol. 6. p. 168.

unser Lauf gerichtet ist, vom Pole der Ekliptik weggerückt, in der jährlichen Periode daher einen dem entsprechenden Kreis zu beschreiben. Die Nothwendigkeit jenes Vorneigens kann man sich durch ein naheliegendes Beispiel anschaulich machen. Will man lothrecht herabfallende Regentropfen durch die Achse eines engen Rohres fallen lassen, so mufs man dieses lothrecht halten, wenn man an derselben Stelle stehen bleibt. Lauft man hingegen mit einer bestimmten Geschwindigkeit vorwärts, so mufs man, soll der Regentropfen bei dem Durchfallen durch das Rohr in der Achse desselben bleiben, und nicht an die Innenwand desselben anschlagen, dasselbe um etwas vorneigen. Die Gröfse dieser Neigung ist natürlich unabhängig von der Länge des Rohres und bestimmt durch das Verhältnifs der Geschwindigkeit des Fortschreitens zu der Geschwindigkeit des herabfallenden Regens. In diesem Beispiele stellt der das Rohr haltende die um die Sonne sich bewegende Erde vor, die fallenden Regentropfen repräsentiren das Licht, das Rohr endlich bezeichnet das Fernrohr des Beobachters. Da nun aus der durch die Aberrationsconstante gegebenen Gröfse des Vorneigens des Fernrohrs sich das Verhältnifs der Geschwindigkeit des Lichtes zu der Geschwindigkeit des Fortrückens der Erde in ihrer Bahn ergiebt, diese letztere aber anderweitig bekannt ist, so läfst sich aus diesen beiden Gröfsen indirect die Geschwindigkeit des Lichtes finden, während Römer's Wahrnehmung sie direct ergiebt. Die Beantwortung der Frage, wie man sich die auf diesem doppelten Wege empirisch festgestellte unglaublich schnelle Fortpflanzung des Lichtes vorzustellen habe, mufste von Einflufs in den Untersuchungen werden, welche die Erscheinungen des Lichtes sich zu ihrem Gegenstande machen.

Wenn ein Geschütz abgefeuert wird, so gehen davon drei Dinge aus: die Kugel, der Schall und der Lichtblitz. Die Kugel, welche in einer bestimmten Entfernung eine Mauer trifft, war früher am Geschütz, nicht so der Donner, welcher als Echo von derselben Mauer abprallt. Der Knall schreitet mit einer Geschwindigkeit fort, welche kein Sturmwind erreicht, trüge die Luft ihn uns zu, wer möchte ihrem Andrange widerstehen? Es ist vielmehr eine stets andere Luftmasse, welche ihn erzeugt, es ist eine fortschreitende Wirkung, nicht ein fortschreitender Körper. Wie ist es nun mit dem Lichtblitze, verhält er sich wie der Schall, oder wie die fortgeschleuderte Kugel? ist das Licht, welches ein Spiegel reflectirt, einer elfenbeinernen Kugel zu vergleichen, welche die Bande des Billards unter demselben Winkel zurückschleudert, als der war, unter welchem sie anflog, oder dem Echo, welches demselben Reflexionsgesetze folgt?

»Wenn wir die ungeheure Geschwindigkeit bedenken, mit welcher sich das Licht nach allen Seiten verbreitet, wenn wir uns erinnern, wie es sich an jeder Stelle kreuzt, ohne sich zu stören, so können wir, meint Huyghens [1]), unmöglich annehmen, dafs das Licht sich bewege wie ein Pfeil, der die Luft durchschneidet. Seine Bewegung mufs analog der des Schalles sein. Von dem Geruche wissen wir, fügt Euler [2]) hinzu, dafs er vermittelt werde durch materielle, vom duftenden Körper verflüchtigte Theile. Bei dem Hören sondert sich aber nichts von den Körpern ab, bei dem Gefühl endlich berühren wir die Körper selbst. Die Entfernung, in welcher wir die Gegenstände vermittelst der Sinne wahrnehmen, ist bei dem Gefühl keine, bei dem Ge-

[1]) Traité de la lumière chap. 1.

[2]) Nova theoria lucis et colorum. Opusc. var. arg. 1746. p. 169.

ruch eine geringe, bei dem Gehör eine bedeutende, die gröfste aber beim Sehen. Wahrscheinlicher sei es also, dafs für Gehör und Gesicht, als dafs für Geruch und Gesicht, dieselbe Verbreitungsart stattfinde, dafs die sichtbaren Gegenstände sich nicht verhalten wie die duftenden, sondern eher wie die tönenden. Doch sei zur Fortpflanzung des Lichtes, analog der des Schalles, ein Aether nöthig, der alle Räume erfülle, dieser aber undenkbar, weil die Himmelskörper in ihm als widerstehendem Mittel sich bewegend retardirt werden würden [1]). Da aber jeder Punkt des Universums erleuchtet werde durch die Lichtstrahlen der Gestirne, so erfüllten die Anhänger der entgegengesetzten Ansicht ihren Himmelsraum mit der Materie des Lichtes, setzten ihn also ebenfalls erfüllt und zwar mit einer heftig bewegten Materie.«

Diese entgegengesetzte Ansicht wurde von Newton [2]) vertheidigt. »Sollten nicht die Lichtstrahlen kleine Körperchen sein vom leuchtenden Körper ausgesendet, fragt er; denn solche Körperchen müfsten sich durch gleichförmige Mittel in geraden Linien bewegen, ohne sich in den Schatten hineinzubiegen, auf welche Art eben die Lichtstrahlen sich fortpflanzen. Grimaldi habe gezeigt, dafs das Licht dicht bei den Körpern vorbeigehend gebeugt werde, wie angezogen von ihnen und zwar je näher, desto stärker, wie auch er gefunden. Da nun die Beugung der Strahlen in der Luft geschehe, noch entfernt von dem scharfen Rande des Körpers, welcher sie beugt, so müsse das Licht, welches den Körper trifft, gebeugt sein, ehe es denselben trifft. Aehnliches finde

[1]) Bekanntlich hat Encke die Umlaufserscheinungen des nach ihm benannten Kometen auf einen solchen Widerstand zurückgeführt.

[2]) Principia philosophia naturalis mathematica und Optics lib. 3. quaest. 29.

statt, wenn das Licht auf Glas falle. Die Brechung geschehe daher nicht in dem Punkte, wo das Licht auffalle, sondern allmählig durch eine continuirliche Beugung der Strahlen halb aufserhalb halb innerhalb der Körper. Bewege sich ein Körper durch zwei einander begrenzende Medien, welche ihn anzögen, so erfolge sein Weg genau nach den Gesetzen der Refraction und Reflexion, wie sie Snellius für das Licht gegeben. Wolle er daher auch nicht darüber entscheiden, ob die Lichtstrahlen Körper seien, oder nicht, so müsse doch gesagt werden, dafs ihre Bahnen ganz mit den Trajectorien der Körper übereinstimmten.«

Es ist etwas Eignes, wie die Natur oft auf einem bestimmten Gebiete den täuscht, welchem sie auf einem andern ihre tiefsten Geheimnisse verräth. Von den Beugungsphänomenen entlehnte Newton die Gründe für die Materialität des Lichtes, und diese Phänomene waren es, an welchen Fresnel [1]) neuerdings ihre Unhaltbarkeit erwies.

Gehen nämlich von den Rändern des beugenden Körpers Anziehungs- oder Abstofsungskräfte aus, welche auf die entfernter vorbeigehenden Lichttheilchen mit geringerer Energie wirken, als auf die näher vorbeistreifenden, so begreift man wohl, wie in der vorher gleichförmig dichten Masse derselben nun Verdichtungen oder Verdünnungen entstehen. Die aus der sich nicht weit erstreckenden Wirkungssphäre jener Ränder heraustretenden Lichttheilchen müfsten aber dann in einem nach allen Seiten auf sie gleichwirkenden Medium sich bewegend geradlinig fortschiefsen. Jene an dem Rande der Schatten entstehenden, abwechselnd hellen und dunkeln Streifen erweisen sich aber, werden sie in ver-

[1]) Sur la lumière. Supplement à la traduction française du traité de chimie de Thomson. Paris 1822.

schiedenen Entfernungen vom schattenwerfenden Körper aufgefangen, als hyperbolisch gekrümmt, ein solcher heller Streifen kann also nicht der sichtbare Weg derselben Lichttheilchen sein. Aufserdem können die Kräfte, welche die Beugung hervorbringen, nicht analog den Kräften sein, welche die Brechung erzeugen, denn die Ablenkung eines aus der Luft in das Innere eines durchsichtigen Körpers schief eindringenden Strahles ist verschieden nach der verschiedenen Natur dieses brechenden Körpers, während die Substanz, aus welcher der Rand gebildet wird, an welchem die Beugungserscheinungen hervortreten, auf diese gar keinen verändernden Einfluſs äufsert, wie quantitativ oder qualitativ verschieden sie auch sei. Schon s'Gravesand bemerkte, daſs die Natur oder die Dichtigkeit der beugenden Körper keinen Einfluſs auf die Beugungserscheinungen habe. Darauf haben Malus und Berthollet diese wichtige Thatsache durch Versuche festgestellt. Sie wendeten bei ihren Beugungsversuchen Platten von Elfenbein und von Metall an, fanden aber keinen Unterschied. Mit gröſserer Schärfe wurde dasselbe von Fresnel nachgewiesen. Er bedeckte einen unbelegten Spiegel mit einer Schicht von Tusche, welche auf feines Papier aufgetragen war, sodaſs das Ganze eine Dicke von $\frac{1}{10}$ Millimeter hatte: mit einem Federmesser wurden darauf 2 Parallellinien gezogen und in dem Zwischenraum Papier und Tusche sorgfältig weggenommen. Eine Spalte von genau gleicher Weite gebildet aus 2 massiven Kupfercylindern von $1\frac{1}{2}$ Centimeter Durchmesser gab aber mit dem Mikrometer gemessen genau dieselbe Erweiterung des durchstrahlenden Lichtes, als die erste. Um zu unterscheiden, ob die Gestalt des Randes einen Einfluſs auf die bei der Beugung hervortretenden Lichtstreifen habe, nahm Fres-

nel 2 Stahlplatten, deren Rand zur Hälfte abgerundet, und zur Hälfte zugeschärft war, und stellte den runden Theil des einen Randes dem geschärften des andern gegenüber und umgekehrt. Aber auch bei dieser verdoppelten Wirkung erschienen die Lichtstreifen nicht mitten durchgebrochen, sondern vollkommen gerade. Endlich hat Haldat [1]) durch Leiter, welche die beugende Spalte bildeten, kräftige electrische Batterien entladen, sie als Poldrähte galvanischer Ketten bis zum Glühen erhitzt, durch Ansetzen kräftiger Magnete magnetisirt u. s. f., ohne dafs bei Umkehrung der Polarität oder überhaupt irgend ein Unterschied in den Beugungserscheinungen sich wahrnehmen liefs.

Aber auch selbst die Erscheinungen der Brechung scheinen Gründe gegen das Emanationssystem zu enthalten. Da nämlich die Brechung des Lichtes bei dem Eintritt desselben aus einem durchsichtigen Medium in ein anderes nach beiden Systemen dadurch entsteht, dafs das Licht sich in beiden Medien mit ungleicher Geschwindigkeit fortbewegt, so wird alles, was die Geschwindigkeit desselben innerhalb des einen Mediums ändert, ohne auf die des andern Einflufs zu haben, die Brechung verändern. Da nun nach dem Emanationssysteme die Lichttheilchen gegen die Materie gravitiren, so müfste die Masse des Körpers, welcher sie aussendet, einen Einflufs haben auf die Geschwindigkeit, mit welcher sie fortgeschleudert werden. Das Licht verschiedener Fixsterne und der Planeten müfste also durch dasselbe Prisma verschieden gebrochen werden. Darauf machte im Jahr 1784 zuerst Mitchel [2]) aufmerksam. Diese Versuche sind nun

[1]) Haldat extrait d'un mémoire sur les causes de la diffraction. Ann. de chim. et de phys. 41. p. 424.

[2]) On the means of discovering the distance, magnitude etc. of

von Frauenhofer [1]) wirklich angestellt worden, und zwar auf eine Weise, welche einen $\frac{1}{9360}$ betragenden Unterschied der ganzen Brechung hätten nachweisen müssen. Alle untersuchten Fixsterne gaben aber dieselbe Brechbarkeit des Lichtes, als die Planeten, ein Resultat, welches vollkommen mit der von Bradley aus den Aberrationserscheinungen abgeleiteten Gleichheit der Geschwindigkeit des Lichtes der verschiedenen Fixsterne übereinstimmt.

Bei der Darstellung physischer Erscheinungen bedürfen wir, um sie uns und andern in ihrem Zusammenhange anschaulich zu machen, bestimmter theoretischer Vorstellungen, durch welche wir das innerhalb eines Gebietes empirisch Gefundene an Phänomene, die in andern Gebieten uns bereits vertraut sind, anzuknüpfen suchen. In der Wahl dieser Analogien kann ein Mifsgriff stattfinden, es kann ein Parallelismus vermuthet werden, wo er nur scheinbar existirt,

the fixed stars in consequence of the diminution of the velocity of their light, in case such a diminution should be found to take place in any of them. Phil. Trans. 1784. p. 35.

[1]) Gilb. Ann. 74. p. 375. Ein Flintglafs-Prisma, dessen Winkel 37° 40′ betrug, bei welchem der einfallende Strahl mit dem ausfahrenden ohngefähr einen Winkel von 26° machte, und dessen Breite 4 Zoll betrug, wurde vor das Objectiv eines Fernrohrs von 4 Zoll Oeffnung befestigt. An diesem Fernrohr war ein zweites kleineres angebracht, dessen Achse mit der des ersten einen Winkel von 26° machte. Von zwei Beobachtern wurde nun von dem einen der Antritt des Sterns am Faden des kleinern Fernrohrs ohne Prisma, und von dem andern der Antritt einer festen Linie des Spectrums an das Schraubenmikrometer im andern beobachtet, und dieselbe Beobachtung ohne Aenderung des Mikrometers an einem anderen Stern wiederholt. Ist bei Einstellung des Fadenkreuzes des kleineren Fernrohres auf den Stern dieselbe Stelle des Spectrums am Mikrometer des gröfseren, so hat das Licht beider Gestirne gleiche Brechbarkeit.

wiederum Zusammengehöriges auseinander gehalten werden. Alle jene grofsen Massen des Sonnensystems hatten sich unterworfen gezeigt den Gesetzen der Newtonschen Gravitation; die bei schärferer Prüfung hervortretenden Abweichungen von der einfachen Gestalt ihrer Bahnen, welche Keppler ihnen zugeschrieben hatte, ergaben sich als nothwendige Folge ihrer gegenseitigen Anziehung; die grofsartigen Oscillationen des Meeres in der Ebbe und Fluth erfolgten nach denselben Gesetzen, wie die Schwingungen des unscheinbaren Pendels, welches die Erde in die Lothlinie zurückzuführen strebt. Lag es nun nicht nahe anzunehmen, dafs das Licht, welches jenen Körpern entströmt, ähnlicher Natur sei, dafs das Sonnentheilchen, welches an einem terrestrischen Körper vorbeieilen will, in die anziehende Wirkungssphäre desselben gelangend, umgelenkt wird, wie der kometenartige Körper, welcher aus dem Weltenraume in das Sonnensystem gelangend, sich von den anziehenden Kräften desselben plötzlich erfafst fühlt und das einförmige Geradeausgehen nun aufgeben mufs, welches ihm bei seiner langen Reise durch die Intermundia bereits wie zur andern Natur geworden war? Kann man sich wundern, dafs die Physiker des vorigen Jahrhunderts glaubten, dafs, wer in den weiten Räumen des Sonnensystems überall das Rechte gefunden, es auch da erkannt haben möge, wo das Materielle in unmittelbarer Nähe wirkt?

Dem Impulse, welchen die Naturwissenschaften zur Zeit Newton's durch das Zusammenwirken jener grofsen Talente erhielten, welche kurz vor ihm lebten, oder seine Zeitgenossen waren, entspricht nicht ein eben so rascher Fortschritt in der folgenden Periode. Es bedurfte einer Zeit, jene Gedanken, welche in den verschiedenen Gebieten auf

eine so grofsartige Weise angeregt worden waren, zu verarbeiten, sie im Detail der Erscheinungen zu rechtfertigen, das skizzirte Schema durch den Inhalt zu erfüllen, welchen schärfere Beobachtungen in immer gröfserem Reichthume darboten. Der Entwickelungsgang einer Wissenschaft ist einem Strome zu vergleichen. In seinem obern Laufe liegen Thalweiten terrassenförmig übereinander, in denen er sich oft ruhig zu einem See verbreitet, als hätte er alle Sehnsucht nach der Ebene verloren, deren Stufen er aber dann in brausenden Stürzen, als wolle er das Versäumte wieder nachholen, überspringt. Immer neue Hindernisse treten hemmend seinem Laufe in der steilen Kluft entgegen, welche spaltenartig beide Terrassen verbindet, aber nun tritt er in die neue Thalweitung, durch reiche Zuflüsse zum mächtigen Strome erstarkt, würde er sich nicht mehr in das enge Bette zwängen lassen, welches er auf der obern Stufe kaum auszufüllen vermochte. Endlich unten angelangt, strömt er in langsam abfallendem Längenthale regelmäfsig weiter, nicht mehr bestimmt durch seine Umgebungen, gräbt er sich selbst sein Bett, um zuletzt mit den andern Strömen in der gemeinsamen Weitung des Meeres sich zu vereinen. Die Naturwissenschaften haben jetzt noch ganz den romantischen Charakter ihres obern Laufes, während die vom Alterthume überlieferten Disciplinen schon sehr die Einförmigkeit der Ebene verrathen. Dies mag ein Vorzug der letztern sein, aber es ist der wenig beneidenswerthe, welchen das Alter vor der Jugend voraus hat.

Jener Uebergang aus einer Periode in die andere ist eine Zeit des heftigsten Kampfes. Hartnäckiger wurde selten einer gefochten, als der, aus welchem die neuere Optik in unsern Tagen hervorgegangen ist. Wenn man bedenkt, dafs

Newton's Emissionstheorie, welche Huyghen's Entdeckungen hatte vergessen machen, unerschüttert durch Euler's[1]) Angriffe noch in Laplace[2]) und Biot[3]) die entschiedensten Vertheidiger fand, wenn man sich daran erinnert, dafs Malus, der Entdecker der Polarisation des Lichtes, sich für sie entschied[4]) und Brewster[5]), an dessen Namen sich alle empirischen Fortschritte der neuern Optik knüpfen, zuletzt allein stehend, unwillig ausrief, er wenigstens wolle nicht vor dem neuen Altare der Wellentheorie knieen, so mufs man bedauern, dafs jener jugendliche Kämpfer, welchem so Grofses gelang, dafs Fresnel nicht mehr den Siegesruf seiner Partei hört, welcher sich in Lamé's Worten[6]): *nous laisserons le parti réduit au silence chercher une excuse de sa défaite dans le rare bonheur de ses adversaires,* fast höhnend ausspricht.

Wer sich auch nur oberflächlich mit der empirischen Seite der Optik vertraut gemacht hat, mufs erstaunen, wenn er hört, dafs die scheinbar unendliche Mannigfaltigkeit der Erscheinungen sich zusammenfassen läfst unter dem einfachen Gesichtspunkte, dafs der Eindruck des Lichtes durch Schwingungen eines elastischen Mediums erregt werde, deren Anzahl die Farbe bestimmt, von deren Weite die Helligkeit

[1]) Lettres à une princesse d'Allemagne sur différentes questions de physique et de philosophie.'

[2]) Sur le mouvement de la lumière dans les corps diaphanes. Mém. de l'Instit. 1809. p. 300.

[3]) Traité de physique expérimentale et mathématique. 1816. Tom. 4.

[4]) Théorie de la double réfraction.

[5]) Observation on the absorption of specific rays in reference to the undulatory theory of light. Edinb. and Lond. Ph. Mag. 2. p. 360.

[6]) Cours de physique 2. p. 300.

abhängt, deren lineare, kreisförmige oder elliptische Gestalt ihre Polarisation hervorbringt. Bei einer nähern Betrachtung dessen, wovon jetzt im Reiche des Lichtes die Rede ist, wird er einsehen, dafs das Vertrauen auf seine Verfassung gerechtfertigt erscheint, denn diese besitzt Elasticität genug, um neue Elemente in sich aufzunehmen, und eine hinlänglich befestigte Grundlage, um nicht von ihnen überwältigt zu werden. Er wird es dann auch begreiflich finden, dafs ein Physiker die Frage, welcher jener beiden optischen Theorieen er folge, überhört, da ihre Antwort sich von selbst versteht.

Aber nicht diese Frage ist es, zu deren Beantwortung man in Deutschland aufgefordert wird. In den Worten: sind Sie ein Anhänger der Newton'schen oder der Goethe'schen Farbenlehre, glauben viele eine Zauberformel zu haben, um sogleich zu entscheiden, ob der Gefragte »auch zu der Gilde gehöre, welche den Unsinn nachbete, den man nun fast hundert Jahre als Glaubensbekenntnifs wiederhole.« Soll man Solchen Rede stehen, denen eben so wenig an der Wissenschaft liegt, als der Wissenschaft an ihnen? Als Talleyrand nach der Julirevolution in London von einem Diplomaten gefragt wurde, was nun werden würde, Krieg oder Frieden, sagte er in seiner treffenden Weise: *ni l'un ni l'autre.* Dieselbe Antwort, doch in einem andern Sinne, pafst auf jene Frage. Sie nicht mifsverstehen setzt aber voraus, dafs man wisse, um was es sich in der Farbenlehre handelt.

Es giebt eine andere höchst achtungswerthe Klasse von Fragern. Wenn man Eckermann's Gespräche mit Goethe liest, so fühlt man, dafs in Goethe's Persönlichkeit etwas so Imponirendes und Hohes gelegen habe, dafs ihm gegenüber jeder Widerspruch verstummte. Auch aus der Ferne hat er auf Viele so gewirkt. Diese vergessen, dafs die Na-

tur immer Recht hat, wir ihr gegenüber uns aber häufig irren, bald dieser, bald jener. Und kann man es ihnen verargen, dafs sie sich gefangen geben in den Zauber der Darstellung, wie er in der Farbenlehre herrscht? Giebt es irgendwo anders einen Styl von so durchsichtiger Klarheit und von so leidenschaftlicher Wärme, durchdringen sich wohl anderswo so innig wie hier, jene scheinbar heterogenen Elemente der Sprache, die im Werther und den Wahlverwandtschaften als gleich vollendete Extreme auseinanderfallen? Was soll man diesen antworten, die nicht gern an einem irre werden möchten, und doch zuletzt die Frage nicht unterdrücken können: was halten Sie von der Goethe'schen Farbenlehre?

Seit einiger Zeit ist es Sitte geworden, sich auch mit dem gröfseren Publikum über physikalische Gegenstände zu besprechen. An eine solche Unterhaltung macht man nicht die strengen, wissenschaftlichen Anforderungen, als an ein systematisches Werk. Daher scheinen mir Gelegenheitsschriften geeignet dazu. Es giebt kein vortrefflicheres Mittel, einen etwa dabei begangenen Fehler schneller in Vergessenheit zu bringen. Die kurze Darstellung der jetzigen Chromatik, welche ich hier geben werde, macht keine weitern Ansprüche.

In Beziehung auf das Wahrnehmen der Gegenstände durch das Auge unterscheiden wir die Körper nach zwei Klassen in selbstleuchtende, welche ohne Vermittelung eines andern Körpers sichtbar sind, und in dunkle, welche der Gegenwart eines Körpers der ersten Klasse bedürfen, um wahrgenommen zu werden. In Gegenwart der stark leuchtenden Körper verschwindet der Eindruck der schwächer leuchtenden, wie wir am deutlichsten an den Sternen sehen,

die bei Tage nur durch lichtstarke Fernröhre sichtbar werden, und an den phosphorescirenden Körpern, deren Anzahl bei steigender Dunkelheit sich immer mehr vergröfsert, so dafs, wo wir klassificirend trennen, in der Wirklichkeit nur ein allmähliger Uebergang stattfindet. Aufser in Beziehung auf die Helligkeit unterscheiden wir die selbstleuchtenden Körper durch ihre Farbe. Schon die Fixsterne bieten darin auffallende Contraste dar, gröfsere das elektrische Licht, nach der Natur der Leiter, aus welchen es hervortritt, den bedeutendsten die Flammen. Das bläuliche Licht einer Weingeistflamme wird blendend gelb, wenn der Docht derselben mit Kochsalz eingerieben ist, intensiv roth durch Strontian, grün durch Kupfersalze u. s. f. Der angenehme Eindruck unserer künstlichen Feuerwerke beruht vorzugsweise auf der geschickten Zusammenstellung und Aufeinanderfolge solcher verschiedenfarbiger Beleuchtungen.

Das auf einen dunkeln Körper auffallende Licht kann, wenn wir die Extreme betrachten, entweder ungehindert durch den Körper hindurchgehen, oder ganz zurückgesendet werden, oder vollkommen aufgehalten. Da keins dieser Extreme in absoluter Strenge in der Natur vorkommt, so wird stets einiges Licht in das Innere des Körpers eindringen, einiges von seiner Oberfläche zurückkehren, endlich ein Theil des auffallenden Lichtes durch Absorption für das Auge verloren gehen. Alles das Auge wirklich treffende Licht kommt daher entweder auf dioptrischem oder katoptrischem Wege in dasselbe, d. h. es durchstrahlt die Körper oder wird von ihnen zurückgestrahlt. Durchscheinend heifst ein Körper, welcher nur in den dünnsten Lamellen durchsichtig wird. Jeder durchsichtige Körper wird, insofern er vom Lichte durchstrahlt wird, ein Mittel

oder ein Medium genannt. Ein absolut durchsichtiger Körper würde gar keinen Schatten werfen und unsichtbar sein. Bei dem Eintritte des Lichtes aus dem leeren Raume in einen durchsichtigen Körper, oder bei seinem Austritt aus einem Medium in ein anderes, ändert es seine Richtung, es wird gebrochen, wenn seine anfängliche Richtung schief gegen die Trennungsfläche war. Das Hervortreten einer Münze über den verdeckenden Rand des Gefäfses, auf dessen Boden sie liegt, ehe Wasser eingefüllt wurde, die Vergröfserung eines Eies in einem cylindrischen Glase voll Wasser, die eigene Täuschung, dafs man in einem gläsernen Würfel einen zweiten kleineren zu sehen glaubt, sind so wie der Anblick des in das Wasser schief gehaltenen Stabes, der gebrochen erscheint, bekannte hierher gehörige Erscheinungen. Wird das auffallende Licht vorwaltend nach Richtungen zurückgeworfen, die in einer bestimmten Gesetzmäfsigkeit auf einander folgen, wenn wir von einem Punkte der Oberfläche zu dem zunächstfolgenden übergehen, so nennen wir den Körper einen Spiegel. Nicht er ist sichtbar, sondern die Gegenstände, welche sich in ihm abbilden. Eine ruhige Quecksilberfläche bietet davon das deutlichste Beispiel dar. Wird hingegen das Licht gleichmäfsig nach allen Richtungen verstreut und zwar unverändert in seiner Farbe, nämlich weifses Licht weifs, rothes roth u. s. w., so heifst der Körper weifs. Wird hingegen von dem auffallenden Lichte nichts zurückgespiegelt und nichts durchgelassen, so nennen wir den Körper schwarz. Ein vollkommen schwarzer Körper ist daher in jeder Beleuchtung unsichtbar, wir schliefsen auf sein Vorhandensein nur dadurch, dafs er uns andere Gegenstände verdeckt. Ein vollkommen weifser Körper erscheint hell in jeder Beleuchtung,

farbige Körper neben weifse gehalten, erscheinen bei bestimmten Beleuchtungen hell, bei andern dunkel, graue bei allen Beleuchtungen dunkler als weifse, und heller als schwarze. Diese Unterschiede sind gültig selbst für die Individuen, welche bestimmte Farben nicht direct von einander zu unterscheiden vermögen, ja sie geben diesen ein praktisches Mittel an die Hand, ihrem mangelnden Farbensinn nachzuhelfen.

Das directe Licht leuchtender Körper und das nach allen Richtungen gleichmäfsig verstreute dunkler, durch welche diese in irgend einer Beleuchtung sichtbar werden, unterscheidet sich von dem gespiegelten undurchsichtiger, und dem durchgelassenen durchsichtiger bei gleicher Helle und gleicher Farbe durch gewisse physikalische Eigenschaften, welche man unter dem Namen der Polarisation zusammenfafst. Da nun der undurchsichtigste Körper in dünnen Lamellen durchscheinend ist, der durchsichtigste doch in grofsen Massen sichtbar wird, so kann man bei jedem nicht selbstleuchtenden Körper das gespiegelte von dem in das Innere eindringenden Licht unterscheiden. Stehen die Strahlen dieser beiden Lichtmassen auf einander lothrecht, so sind die Eigenschaften, welche das gespiegelte von dem directen Licht unterscheiden, in gröfster Intensität vorhanden. Das gespiegelte Licht heifst dann im Gegensatz des unpolarisirten directen vollständig polarisirt, in jedem andern Falle theilweise polarisirt. Fällt polarisirtes Licht auf eine rauhe Oberfläche, die es gleichmäfsig nach allen Richtungen verstreut, so verliert es die durch die Spiegelung oder Brechung erhaltenen Eigenschaften wieder, es wird depolarisirt. Bei den durchsichtigen Körpern, welche Doppelbilder hervorbringen, ist das Licht, welches diese erzeugt, vollständig polarisirt, die beiden Bilder unter-

scheiden sich aber, wie bei einfach brechenden Körpern der gespiegelte Strahl vom durchgelassenen, man nennt sie rechtwinklich auf einander polarisirt, weil dieselben physikalischen Eigenschaften sich bei ihnen in zwei auf einander senkrechten, durch die Strahlen gelegten Ebenen finden.

Fragen wir nach den Bedingungen, unter welchen am Licht Farben hervortreten, so werden wir die physischen Farben den physiologischen Farben gegenüberstellen, jene objectiv gleichzeitig für jedes wahrnehmende Auge, diese subjectiv im Organ eines bestimmten Individuums mehr oder minder selbstständig entwickelt. Unter den physischen Farben werden wir die ursprünglichen, permanenten von den apparenten unterscheiden, jenachdem nämlich das farbige Licht direct von dem leuchtenden Körper zum Auge gelangt, oder indirect. Das Licht der selbstleuchtenden Körper ist nämlich farbig und wird farbig. Das Farbigwerden geschieht auf dreierlei Weise, durch Brechung, Interferenz und Absorption. Die apparenten Farben d. h. die Farben, welche im Conflict leuchtender und beleuchteter Körper entstehen, zerfallen demnach in drei Hauptklassen:

1. Prismatische oder Brechungsfarben. Hierzu gehört das sogenannte prismatische Spectrum, subjectiv oder objectiv betrachtet, d. h. unmittelbar durch das unbewaffnete oder bewaffnete Auge aufgefangen, oder nachdem es vorher auf eine rauhe Fläche geworfen, die durch Linsen entstehenden Farben, der farbige Bogen, welcher in einem Reflexionsprisma den Raum totaler Reflexion von dem der theilweisen trennt, die schwachen Farben zwischen den gekreuzten Spiegeln eines Polarisations-Apparates ohne zwischen gehaltene doppel-

brechende Platten, die Farben, welche durch wiederholte Spiegelung an Metallen immer intensiver hervortreten, der Haupt- und Nebenregenbogen, die gröfseren Höfe.

2. Die Farben der Interferenz, welche in zwei Hauptklassen zerfallen, jenachdem nämlich der Gangunterschied der zusammentreffenden Strahlen durch Ungleichheit in den Wegen hervorgebracht ist, welche die von einem Punkte ausgehenden Strahlen durchliefen, um zu einem Punkte zu gelangen, oder durch Ungleichheit der Geschwindigkeit, mit welcher sie in einem doppeltbrechenden Mittel denselben Weg durchlaufen.

Zu der ersten Abtheilung gehören:

*a*) die Farben dünner Blättchen (epoptischen) und zwar: die Newtonschen Ringe, die Farbe der Seifenblasen, eines Oelhäutchens auf Wasser, einer angehauchten Fläche durch Reflex gesehen, die Farbenstreifen an den Sprüngen des Gypses, Kalkspaths und Glimmers, die Farben dünn ausgeblasenen Glases und Collodiums, eines durch Wärme oder galvanische Niederschläge angelaufenen Metalls, die schillernden Farben an den der Feuchtigkeit und Sonne ausgesetzten Fensterscheiben, endlich die natürlichen Farben mancher Körper, welche unter verschiedener Neigung verschiedenfarbig erscheinen;

*b*) die Farben der doppelten Platten, nämlich unbelegter und belegter Hohlspiegel mit auffangendem Schirm, geneigter Glasplatten, die Farben des Fresnelschen Interferenzspiegels und Interferenzprismas, endlich die Farben durch Interferenz des gespiegelten Lichtes mit dem einen Spiegel direct vorbeigehenden, wie in dem Versuch von Lloyd.

*c*) Beugungsfarben (paroptisch), die an Spinneweben im Sonnenlicht, die Farbenstreifen am Schatten schmaler Körper in divergirendem Lichte, an einer engen Spalte, an dioptrischen Gittern, die Höfe um eine Flamme, welche durch ein mit feinem Pulver bestreutes oder angehauchtes Glas betrachtet wird, die kleinen Höfe um Sonne und Mond, die supernumerären Bogen am Regenbogen;

*d*) irisirende oder Perlemutterfarben, die der Reflexionsgitter, der Perlemutter und vielleicht mancher Insectenflügel.

Zu der zweiten Abtheilung gehören:

die Polarisationsfarben (entoptischen) in doppeltbrechenden Krystallen, gekühlten und gepreſsten Gläsern, erhärtetem Gummi, den Augen gewisser Fische und den circularpolarisirenden Flüssigkeiten, ohne vorläufige Polarisation in den idiocyclophanischen Zwillingskrystallen.

3. Die Farben der Absorption. Sie zerfallen in zwei Klassen:

*A.* die des unpolarisirten Lichtes und zwar

*a*) die dioptrischen, der farbigen Gläser, der einfach brechenden Krystalle, farbiger Flüssigkeiten und Gase;

*b*) die katoptrischen, Pigmente, natürliche Farben der Körper;

*B.* die des polarisirten Lichtes, nämlich

die Farben der dichroitischen Krystalle.

Man hat mitunter die Farben der dritten Klasse als körperliche Farben den prismatischen und Interferenzfarben als flüchtigen gegenübergestellt, ja sogar verlangt, daſs Schlüsse von den prismatischen Farben, als ent-

stehenden, nicht auszudehnen seien auf körperliche Farben, als vorhandene. Wenn ich das intensive Roth der Spitzen unserer Zündhölzchen oder den rothen Schnitt eines Buches bei einer durch Kochsalz gelbgemachten Weingeistflamme betrachte, so sind sie vollkommen verlöscht, der Schnitt des Buches erscheint nicht etwa orange, sondern farblos, wie der Schnitt eines Buches, welcher gar nicht angestrichen worden war. Wäre das Roth in dem vorherangegebenen Sinne eine vorhandene Farbe, so würde es sich in der gelben Beleuchtung doch als roth geltend machen. Das Roth entsteht erst in der weifsen Beleuchtung. Solche Unterscheidungen, wie vorhandene und entstehende Farben, sind auf dem naturhistorischen Standpunkte zu gebrauchen, sie sind aber ganz unphysikalisch. Der Physiker fragt, wie entstehen im Conflict der Beleuchtung und der Körper die Farben? sie sind ihm ein Procefs, von welchem er sich Rechenschaft abzulegen hat, nicht ein Product, welches ihm überliefert wird.

Indem wir daher die Gesammtheit der Farbenerscheinungen, welche nicht direct an der Beleuchtung hervortreten, sondern erst durch Brechung, Interferenz oder Absorption an ihnen hervorgerufen werden, unter dem Namen der apparenten zusammenfassen, haben wir als Aufgabe der Chromatik zugleich die Beantwortung der Frage ausgesprochen, wie wird das Licht an den Körpern und durch die Körper farbig, und warum ist es auch ohne Vermittelung nichtleuchtender Körper farbig.

Die ursprünglichen sowohl, als die apparenten Farben sind entweder homogen oder nichthomogen.

Die Farbe eines leuchtenden Körpers heifst rein oder homogen, wenn in ihrer Beleuchtung alle nichtleuchtenden

Körper nur Abwechselungen von gröſserer oder geringerer Helligkeit zeigen, ohne den Unterschied, welchen wir als Farbendifferenz aussprechen. In einer rein rothen Beleuchtung verlöschen daher alle übrigen Farben, und zwar erscheinen in ihr die Körper am hellsten, welche in intensiv weiſser Beleuchtung weiſs erscheinen oder mit demselben Roth, wie jene rothe Flamme im Dunkel. Auf dieselbe Weise heiſst eine Flamme dichromatisch, in deren Beleuchtung zwei im weiſsen Lichte verschiedene Farben nicht verlöschen. Da nun in einer weiſsen Beleuchtung alle Farbenunterschiede am stärksten hervortreten, so wird zwischen einer monochromatischen Flamme und einer weiſsen der gröſstmöglichste Unterschied stattfinden, ein Licht, je weiſser es wird, daher desto mehr von der Monochromasie sich entfernen. Die Zwischenstufen zwischen dem monochromatischen Lichte und dem weiſsen werden durch die nichthomogenen Farben gebildet. So viel monochromatische Farben man unterscheidet, so viel Stufenleitern zum Weiſsen wird es daher geben. Die Farbe eines nichtleuchtenden Körpers ist homogen, wenn sie nur in einer homogenen Beleuchtung nicht verlöscht, aber in allen übrigen. Ganz dieselben Unterschiede lassen sich für durchsichtige Körper feststellen. Ein rein rothes Glas ist daher undurchsichtig für alle homogenen Farben, roth ausgenommen, ein homogen gelbes für alle homogenen Farben, gelb ausgenommen u. s. f. Die Namen monochromatisch, dichromatisch u. s. f. haben für katoptrische und dioptrische Farben demnach entsprechende Bedeutungen.

Das menschliche Auge besitzt nur in geringem Grade die Fähigkeit, unmittelbar eine homogene Farbe von einer nichthomogenen Farbe zu unterscheiden. Es bedarf daher schärferer Prüfungsmittel, um darüber zu entscheiden, ob

eine Farbe homogen sei oder nicht. Weifses Licht giebt, den oben angegebenen Bedingungen unterworfen, zu den lebhaftesten Farben Veranlassung. Farbiges Licht nun, welches denselben Bedingungen des Experiments unterworfen, nie zu einer neuen Farbe Veranlassung giebt, sondern nur Abwechselungen von hell und dunkel zeigt, heifst homogen. Die verschiedenen Prüfungsmittel haben aber nicht gleiche Schärfe. Ein leuchtender Körper, welchen man nach seinem Verhalten bei der Darstellung der Beugungsfarben, Gitterfarben, der Farben dünner Blättchen und der Polarisationsfarben, d. h. in Beziehung auf die sogenannten Farben der Interferenz, homogen halten würde, erweist sich, im Prisma betrachtet, oft noch vielfarbig. Auch bedarf es einer Schärfung des bloſsen Auges durch optische Hülfsmittel, um selbst dann die hierbei möglichst vollkommene Sicherheit zu erhalten. Diese Sicherheit ist aber dennoch keine absolute, die dioptrischen Prüfungsmittel farbiger Medien scheinen nämlich das Licht als nicht homogen nachzuweisen, welches nach der Aussage des Prisma vollkommen homogen war.

Brewster [1]) glaubt nämlich bewiesen zu haben, daſs der Farbeneindruck des Spectrums durch das Zusammenwirken der drei Grundfarben: Blau, Gelb und Roth hervorgebracht werde, welche über den erleuchteten Raum in ungleicher Intensität verbreitet sind, deren Maximum sich aber an verschiedenen Stellen findet. Bringt man das Spectrum auf die Weise hervor, daſs man darin vermittelst eines Fernrohrs die von Frauenhofer entdeckten dunkeln Linien wahrnimmt, so galt jede der Nuancirungen dieser Farben-

[1]) On a new analysis of light, indicating three primary colours, forming coincident Spectra of equal length. Edinb. Trans. 12. p. 123.

folge als optisch homogen, weil es durch keinen Versuch gelungen war, aus dem Lichte der Stelle, an welchem wir jene Nuancirung wahrnehmen, einen andern Farbeneindruck zu entwickeln, als den, welchen sie selbst hervorbringt. Brewster hat nun aber gefunden, dafs, wenn man die verschiedenen Stellen dieses Spectrums der verdunkelnden Wirkung verschiedenfarbiger Medien unterwirft, man zuletzt Lichteindrücke von ihnen erhält, in welchen das Auge nur die Unterschiede der Helligkeit anerkennt, ohne sich einer Farbendifferenz zwischen ihnen bewufst zu werden. In dem Raum also, welchen wir als das reinste Gelb ansprechen, kann durch farbige Gläser und durch Flüssigkeiten, welche für gelbes Licht sich wie undurchsichtige Körper verhalten, aber dem Roth und Blau durchgängig sind, zuletzt ein schwaches Violett erzeugt werden, in dem blauen Raume durch andere Medien ein schwaches Orange, in dem rothen ein schwaches Grün. Um das prismatische Gelb daher in ein für alle Prüfungsmittel wahrhaft homogenes zu verwandeln, mufs es betrachtet werden durch ein Medium, welches jenes schwache begleitende Violett vollständig unterdrückt.

Gegen die Brewsterschen Versuche hat aber Helmholtz geltend gemacht, dafs einige der auffallendsten seiner Resultate von einer Vermischung des regelmäfsig gebrochenen Lichtes mit solchem herrühren, welches theils aufserhalb theils innerhalb des Auges regelmäfsig zerstreut wird, und dafs aufserdem die physiologischen Erscheinungen des Contrastes die Beurtheilung der Farbe beeinträchtigen, wenn wir ein schwach erleuchtetes farbiges Feld neben einem sehr viel helleren betrachten.

Bei dem Mangel der Unterscheidungsfähigkeit des Auges und bei der geringen Anzahl der Bezeichnungen, welche die

Sprache für die Farbenunterschiede darbietet, wird es nicht auffallen, dafs das Verschiedenartigste oft unter einem Namen zusammengefafst wird. Dies gilt nicht nur für die Farben, sondern auch für das Weifs, von dem Prevost sagt: *la blancheur n'est qu'une sensation relative, c'est toujours celle, que fait naitre la lumière dominante.* Monge hat vollkommen Recht, dafs, wenn wir weifse Flächen und rothe Flächen durch ein rein rothes Glas betrachten, wir diese Flächen nicht roth sehen, sondern eher weifs nennen. Ist es nun wohl auffallend, dafs wir die Flamme einer Wachskerze, einer Gasflamme, das Tageslicht, bei heiterm und bedecktem Himmel, Mittags und Morgens, jede allein gesehen weifs nennen, während doch eine Gasflamme, auf den weifsen Abendhimmel projicirt, vollkommen gelb erscheint, ja ein Wachslicht sogar in das Gelbrothe zieht. Diese bei oberflächlicher Betrachtung übersehenen Färbungen des weifsen werden dem geübten Auge des Malers in dem Einfluſs der Beleuchtung auf die körperlichen Farben bemerklich. Der blaue Himmel macht eine blaue Farbe stärker blau, eine gelbgrüne völlig grün, eine braunschwarze schwarz, eine dunkelrothgelbe braun, eine rothe mehr oder minder violett, während hingegen die Abendröthe das Blau in Purpur, Gelb in Pomeranzengelb, Mennige in Zinnober verwandelt, bei dem Lichte einer Wachskerze Blau und Grün schon nahe aneinander treten. Treten nun solche Unterschiede bei Beleuchtungen hervor, die wir noch als farblose ansprechen, so läfst sich noch weniger Bestimmtheit bei der Bezeichnung der Farbe erwarten. Auch sieht man leicht ein, dafs innerhalb der verschiedenen Gebiete der künstlerischen Anwendung, der technischen Bereitung und der wissenschaftlichen Betrachtung der Farbe ein ganz verschiedener Sprach-

gebrauch, was die Bezeichnung betrifft, stattfinden wird. Der Maler wird daher eine Farbe als rein bestimmen, welche der Physiker als zusammengesetzt verwirft, und umgekehrt wird der Physiker von reinen Farben sprechen, die der Maler als gemischte bezeichnet. Es wäre lächerlich, hier den Ausspruch des einen dem andern als Autorität vorzuhalten, denn dem an die Unmittelbarkeit der Natur gewiesenen Maler ist von vornherein eine ganz andere Aufgabe gestellt, als dem Naturforscher, welcher von der Beobachtung zum Versuche weiter gehen muſs, da die natürlichen Combinationen der einfachen Elemente, welche er sucht, oft nicht in der zu ihrer Bestimmung hinlänglichen Anzahl vorhanden sind, er daher jenen natürlichen Verbindungen künstliche hinzufügen muſs. Auſserdem stellt der Maler alle von ihm beobachteten Erscheinungen durch Pigmente dar, seine praktische Thätigkeit bewegt sich also ganz im Reiche des reflectirten und zwar des nach allen Seiten hin gleichmäſsig verstreuten Lichtes. Die physikalische Beobachtung umfaſst aber ebenso das regelmäſsig gespiegelte und das gebrochene Licht, welches sich von dem directen und gleichförmig zerstreuten durch seine Polarisation unterscheidet, die durch kein Pigment dargestellt werden kann. Es giebt daher in der physikalischen Farbenlehre Unterschiede, welche ganz auſserhalb der Sphäre der Malerei liegen.

Auch hier bietet die Klanglehre ganz analoge Erscheinungen. Es ist nicht unwahrscheinlich, daſs das, was wir Klang nennen, durch kleinere Schwingungen eines tönenden Körpers hervorgebracht wird, welche gleichzeitig mit den die Höhe des Tones bestimmenden, allein deutlich wahrnehmbaren Hauptschwingungen hervorgebracht werden, durch welche ein Ton derselben Höhe, auf verschiedenen Instrumenten

erregt, sich als ein verschiedener kund giebt. Sowie nun der praktische Musiker diese Modification des Klanges benutzt, um in seinen Compositionen eine noch gröfsere Mannigfaltigkeit der Eindrücke hervorzubringen, als das bloſse Höhenverhältniſs der Töne zu erzeugen vermag, ja oft einen bedeutenden Effect dadurch erzielt, daſs er dieselbe Weise auf verschiedenen Instrumenten nacheinander vortragen läſst, so wird auch der Maler vorzugsweise auf dem Gebiete der zusammengesetzten Farben sich bewegen, das, was wir Farbenton nennen, daher ohngefähr dem Klange in der Musik entsprechen. Bei der wissenschaftlichen Betrachtung des Tones müssen aber jene Elemente auseinandergehalten werden, wo es sich um Tonverhältnisse handelt, kann nicht zugleich vom Klange die Rede sein, denn die Melodie ist unabhängig von dem Klange des Instruments, welches sie vorträgt. Die wissenschaftliche Behandlung der Farben in der Chromatik muſs ebenso die Schwingungsverhältnisse der Netzhaut in ihrer gröfsten Einfachheit, d. h. bei homogenen Farben untersuchen, um daraus erst die einer complicirteren Periodicität beurtheilen zu können. Eine Farbenlehre, die nicht zum Bedürfniſs der Homogeneität der Farben gekommen ist, ja wo dieses Bedürfniſs vorhanden ist, es nicht begreift oder vielmehr, wie die Goethe'sche es durch »gemahlte Newton'sche Mucken« verspottet, ist einer Akustik zu vergleichen, in welcher von Tonverhältnissen nicht die Rede sein soll, oder in der es gleichgültig ist, ob die Töne rein oder unrein, es ist der Standpunkt äuſserlicher Wahrnehmung, wo eben von Theorie noch gar nicht die Rede ist.

Ordnen wir eine Menge farbiger Wollen, farbiger Papiere, oder bunter Gläser, durch welche eine weiſse Grundlage hindurch wirkt so, daſs die neben einander liegenden Farben am

allmähligsten in einander übergehen, so werden sie sich in einen Kreis zusammenschliefsen, in welchem Roth, Orange, Gelb, Grün, Blau, Violett auf einander folgen, und wo das Violette sich wiederum an das Rothe anschliefst. Diesen Kreis hat zuerst Castel in seiner *Optique des Couleurs* angeordnet. Sehr schön dargestellt findet er sich in Schiffermüller's Versuch eines Farbensystems p. 14. Wien 1772, der darin 12 Nuancen unterscheidet, nämlich Blau, Meergrün, Grün, Olivengrün, Gelb, Orange, Feuerroth, Roth, Carmoisin, Veilchenroth, Veilchenblau, Feuerblau. Die diametral einander gegenüberstehenden Farben sind Roth und Grün, Blau und Orange, Gelb und Violett. Sie sind dem Maler als Farben des Contrastes wichtig, ebenso bedeutend aber dem Physiker, welcher sie Ergänzungsfarben nennt, weil sie in den Interferenzerscheinungen sich immer an dem Lichte zeigen, welches in gespiegeltes und gebrochenes oder in doppeltgebrochenes zerfällt, und welche auch geforderte Farben heifsen, weil sie in den physiologischen Farbenerscheinungen, welche das Organ selbstständig entwickelt, mit überraschender Energie hervortreten.

Bei dem Anblicke des Orange werden wir unmittelbar an die begrenzenden Farben Roth und Gelb erinnert, bei dem Violett an Blau und Roth. Dies ist viel weniger bei dem Grün der Fall, welches sich weit mehr als eine selbstständige Farbe geltend macht, und daher auch in den meisten Sprachen neben Roth, Blau und Gelb einen eigenen Namen erhalten hat, von Leonardo da Vinci auch neben jenen drei Farben mit Weifs und Schwarz zu den einfachen Farben gezählt wird. Da wir aber in der Technik häufig Grün aus Blau und Gelb mischen, so wird man für die Pigmente immer mit drei Grundfarben ausreichen, wie Tobias

Mayer im Jahre 1758 durch sein Farbendreieck erwies, welches Lambert im Jahre 1772 durch Einführung allmähliger Aufhellung vermittelst des Weifsen in eine Farbenpyramide verwandelte.

Oeffnen wir nun jene Farbenfolge zwischen Roth und Violett, so erhalten wir die allmäligen Abstufungen des prismatischen Sonnenbildes, des sogenannten Spectrums. Wie viel solcher Abstufungen in ihm unterschieden werden sollen, wird immer mehr oder weniger willkürlich bleiben. Lambert bemerkt in dieser Beziehung ganz richtig: »Daraus, dafs die prismatischen Farben sich stufenweise ineinander verlieren, folgt, dafs davon weder die sieben Newton'schen, noch mehrere von Andern angegebene Farben sich als eigentliche Grundfarben ansehen lassen. Man kann diese Farben nach allen ihren Mittelstufen im Cirkel herumlegen, weil dann das Rothe an das Violette wieder anstöfst, und zugleich zeigt, wie das Rothe sich nach und nach ins Blaue zieht. Dies vermehrt einigermafsen die Schwierigkeit, die wahren Grundfarben und ihre Anzahl zu bestimmen, weil dabei weder Anfang noch Ende ist. Man findet aber ohne Mühe, dafs man mit zwei Farben nicht ausreicht, sondern das Rothe, das Blaue und das Gelbe genommen werden mufs. Denn aus diesen ergeben sich die übrigen prismatischen Farben. Roth und Gelb giebt alle Orangefarben, Gelb und Blau giebt die grünen. Endlich mit Blau und Roth reicht man für die Indigo-, Violett- und Purpurfarben aus.«

Dafs von einer bestimmten Anzahl der Farben im prismatischen Bilde nicht die Rede sein könne, gehe, meint d'Alembert, auch daraus hervor, dafs sich zwischen den Farben des Spectrums dunkle Zwischenräume finden müfsten, welche mit der Entfernung vom Prisma an Breite zunehmen

würden bei gleichbleibender Breite der hellen Farbenräume (Opusc. 3. p. 393). Empirisch sucht dasselbe Rochon [1]) zu beweisen, welcher das mit Fernröhren betrachtete Spectrum verschiedener Fixsterne als eine Lichtlinie ohne irgend eine Unterbrechung sah. Auch war Newton selbst so weit entfernt, die von ihm gemachte Unterscheidung des Spectrums in sieben Abtheilungen als eine bestimmte, über welche nicht hinausgegangen werden sollte, anzusehen, dafs er ausdrücklich sagt: *imago ista composita est ex illis aliisque innumeris intermediis circulis ordine continuo inter duo rectilinea et parallela oblongae solis imaginis latera dispositis.* Bei optischen Untersuchungen, welche sich auf bestimmte Stellen des Spectrums beziehen, bedarf es aber einer sie scharf bestimmenden Bezeichnung, welche durch die von Frauenhofer entdeckten festen Linien endlich sicherer erreicht worden ist, als durch die Angabe der Grenzen der verschiedenen Farben, welche Newton in diesem Falle wählte.

Unter der grofsen Anzahl dunkler Linien, welche in dem Sonnenspectrum, durch welche brechende Substanz es auch erzeugt sei, sich zeigen, zeichnen sich nämlich einige durch ihre Stärke vor allen übrigen aus. Diese hat Frauenhofer durch die Buchstaben A. B. C. D. E. F. G. H. bezeichnet. Alle neuern Messungen beziehen sich nun auf diese festen Linien, da die Bezeichnung »im Roth, im Grün« etc. wegen der Breite des farbigen Raumes zu viel Unbestimmtheit enthält, aufserdem die Fähigkeit der Farbenunterscheidung bei verschiedenen Individuen höchst verschieden ist. Von diesen Linien liegt A. so nahe an der äufsern schwachen

[1]) Recherches sur la nature de la lumière des étoiles fixes, Recueil de Mém. p. 13.

Grenze des Spectrums, dafs es selten zu Bestimmungen angewendet werden kann, B. nicht weit vom Anfang des hellen Roth in demselben, C. ohngefähr in der Mitte desselben, D. eine Doppellinie im Orange, E. aus mehreren feinern Linien bestehend in Grün, nicht weit von dem aus drei starken schwarzen Linien, ungleichen Abstands, bestehendem *b.*, F. eine starke einfache Linie im Blau, G. an der Grenze des Indigo, nicht weit vom Violett, H. im Violett sehr kenntlich durch einen eben so breiten dunkeln Streifen weiter nach der Grenze des Violett hin, an dessen äufserster Grenze I. schwach hervortritt.

Die Frage, durch die Mischung welcher Anzahl von Grundfarben man die verschiedenen Nuancirungen der Farbeneindrücke hervorbringen könne, ist eine ganz andere Frage, als die, ob einer dieser verschiedenen Eindrücke durch eine homogene, oder durch eine nicht homogene Farbe hervorgebracht werde. Die Mosaikarbeiter sortiren die Mineralien, welche sie bei ihren Zusammenstellungen gebrauchen, in mehrere tausend Kästchen, ebenso ist es, wie wir oben anführten, seit Auffindung der festen Linien des Spectrums möglich geworden, die Schärfe der Bezeichnung innerhalb desselben viel weiter als früher auszudehnen, indem man jetzt mehrere hundert Stellen bezeichnen kann, wo Newton nur sieben Abstufungen in der Benennung unterschied. Jede dieser Stellen kann homogen sein, ja es giebt Mittel, sie wirklich homogen zu machen. Damit ist aber gar nicht gesagt, dafs nicht derselbe Farbeneindruck durch eine gemischte Farbe hervorgebracht werden könne, wie durch eine homogene. Newton äufsert in einem Briefe an Oldenburg, dafs, wenn aus der Reihe der prismatischen Farben zwei nicht zu weit auseinander liegende gemischt werden, durch

ihre Vereinigung diejenige Farbe entstehe, welche in jener Reihe mitten zwischen beiden liege. Ebenso fand Young, dafs Gemische von prismatischem rothen und grünen Licht vollkommen die Empfindung von Blau, Gemische von grünem und von violettem Licht ebenso die Empfindung von Gelb hervorbringen. Bei dem Streit über das prismatische Grün hat man immer sich auf die Maler berufen, welche einstimmig (wahrscheinlich wird Leonardo da Vinci nicht zu den Malern gezählt) das Grün zusammengesetzt nennen, hingegen Blau, Roth und Gelb als einfach bezeichnen. Man hat aber dabei nicht berücksichtigt, dafs die Maler bei bestimmtem Roth, Blau und Gelb ebenso den Namen einfach oder rein gebrauchen, wo sich selbst in ihrer Art des Hervorbringens dieses Farbeneindrucks leicht nachweisen läfst, dafs derselbe vielfachfarbig zusammengesetzt ist. Das liegt, obgleich es wohlweislich verschwiegen wird, so zu Tage, dafs man von der Autorität der Maler zu der der Philosophen übergegangen ist, nach deren Ausspruch es von vorn herein widersinnig sei, zu behaupten, dafs ein Farbeneindruck, von dem man nachweisen könne, dafs er durch einen gemischten Eindruck oft erzeugt werde, je durch einen einfachen hervorgebracht werde. Was nun die Richtigkeit dieses Satzes betrifft, so widerlegt er sich vollständig in dem nahen Gebiete des Tones.

Eine reine Quinte entsteht durch das Zusammenfallen zweier Töne, von denen der eine in derselben Zeit die umgebende Luft zweimal verdünnt und verdichtet, während der andere jedesmal drei solcher Verdünnungen und Verdichtungen erzeugt. Die erste, dritte, fünfte etc. Verdichtung des ersten Tones fällt demnach zusammen mit der ersten, vierten, siebenten etc. Verdichtung des zweiten; die Luft in der

Nähe des Trommelfells wird dasselbe stärker bei den zusammenfallenden Schwingungen hineinbiegen, als bei den nicht zusammenfallenden. Dieser stärkern Biegungen werden wir uns als gehörter tieferer Octave des tiefern Tones bewufst, da dies Zusammentreffen halb so oft geschieht, als die Schwingungen dieses tiefern Tones, und dreimal weniger häufig, als die des höhern. Dieser tiefere Tartinische Ton wird in demselben Sinne als zusammengesetzt angesehen werden, in welchem von dem nicht homogenen Grün gesagt wird, dafs sein Eindruck erregt werde durch den zusammenfallenden Eindruck des Blauen und Gelben, denn im Sinne der neuern Wellentheorie ist das Bewufstwerden des Gelben und des Blauen nichts anderes, als ein Bewufstwerden einer bestimmten, für beide verschiedenen Anzahl von Schwingungen der Netzhaut. Nun wird aber wohl Niemand leugnen, dafs ein Ton derselben Stärke (Helligkeit) und derselben Höhe (Farbe) durch Schwingungen einer einzigen Saite hervorgebracht werden könne, dafs es also dasselbe C. giebt einfach und zusammengesetzt. Ist denn überhaupt die Natur so arm, dafs sie nur einen Weg weifs, ihre Zwecke zu erreichen?

Statt des Verlöschens einer homogenen Farbe in einer anders farbigen homogenen Beleuchtung, sehen wir in der Regel nur eine Modification des beleuchteten farbigen Körpers durch die farbige Beleuchtung, denn die verschiedenen Naturreiche bieten uns unmittelbar keine homogenen Farben dar; die Mineralfarben, sowie die Farben, welche die Vegetation und die Thierwelt in so unendlichem Reichthume entwickeln, sind im optischen Sinne zusammengesetzt. Von den leuchtenden Körpern gilt dasselbe, so sehr auch ein Element in der Regel vorwaltet. Es bedarf daher zur

Darstellung einer homogenen Farbe einer experimentalen Beseitigung des andersfarbigen, denn wenn es sich um die Natur des Rothen handelt, so mufs abgesehen werden, von Allem, was nicht Roth ist. Das Beseitigen geschieht im eigentlichsten Wortsinne in dem durch das Prisma oder durch ein Drahtgitter hervorgebrachten Spectrum, insofern nämlich hier das Verschiedenfarbige neben einander gelegt wird, das Absehen hingegen durch Vernichten des Andersfarbigen, welches wir durch Körper auffangen, die für dasselbe undurchsichtig sind. Von diesen verschiedenen experimentalen Methoden der Darstellung homogenen Lichtes sind einige erst neuerdings gefunden, manche der früher bekannten wesentlich verbessert worden. In Beziehung auf die Lichtquellen zerfallen sie in zwei Klassen, je nachdem nämlich die homogene Farbe am weifsen Licht entwickelt wird, oder an dem bereits farbigen. Alle Versuche, welche ein sehr energisches Licht verlangen, werden vorzugsweise an homogenen Farben dargestellt, welche durch Brechung, Beugung oder Absorption am Sonnenlicht hervortreten. Ueberhaupt wird man weifses Licht als Quelle da wählen, wo man eine Erscheinung in verschiedenen homogenen Beleuchtungen neben einander betrachten will. Die häufige Bewölkung des Himmels, das Fortrücken des prismatischen Sonnenbildes während des Versuches, welches Messungen ohne Anwendung eines Heliostaten, der das Sonnenbild fixirt, fast unmöglich macht, beschränken aber die Anwendung der von Newton stets gewählten Darstellung homogener Farben durch das Prisma. Sie wird daher jetzt vorzugsweise nur da angewendet, wo man messende Bestimmungen an die festen Frauenhofer'schen Linien anknüpfen will. Die von Frauenhofer eingeführte Anwendung langer Spalten

und cylindrischer Linsen statt kleiner runder Oeffnungen und Convexlinsen, deren Newton sich bediente, die subjective Beobachtung des durch einen Heliostat fixirten Spectrums durch ein gutes achromatisches Fernrohr statt seiner objectiven Betrachtung mit bloſsem Auge, endlich die groſsen Vorzüge der Münchener Flintglaſsprismen und Crownglasprismen vor den früher angewendeten besten englischen, und die Vollendung der von Frauenhofer verfertigten Gitter haben es möglich gemacht, diesen Versuchen eine Präcision zu geben, welche zu Fundamentalbestimmungen geführt hat, deren die Theorie bedurfte, um die Fragen zur Entscheidung zu bringen, zu deren Beantwortung früher nicht einmal eine Aussicht vorhanden gewesen war. Abgesehen aber von dieser bei messenden Bestimmungen erforderlichen äuſsersten Genauigkeit, ist durch die Anwendung farbiger Gläser, farbiger Flammen und ihre Combination die Darstellung der Versuche in homogener Beleuchtung so erleichtert worden, daſs die Farbenlehre bei schärferer Begründung zugleich zugänglicher geworden ist, ja man darf die Hoffnung nicht aufgeben, daſs die jetzt gebräuchlichen Bereitungsarten homogener Farben durch noch einfachere werden ersetzt werden. Die eben besprochenen vorläufigen Brechungs-, Beugungs- oder Absorptionsversuche, welche jeder genauern optischen Untersuchung vorangehen, sind es nun aber vorzugsweise, welche als Taschenspielerstückchen, als unnöthige Complicationen der Erscheinung, verdächtig gemacht worden sind. Daſs man, wenn man den Ton eines musikalischen Instrumentes beurtheilen will, sich nicht in den Lärm der Straſse begiebt, wird jeder natürlich finden: ist es denn so schwer zu begreifen, daſs, soll ein Schwachleuchtendes beurtheilt werden, man in ein dunkles

Zimmer tritt, um das volle Tageslicht abzuwehren. Will einer Gegenstände aus einander legen, so wird er, ist nur ein geringer Raum vorhanden, sie schmal nehmen müssen, sollen sie nicht über einander greifen. Braucht man nun wohl ein Mathematiker zu sein, um den Grund einzusehen, warum bei prismatischen Versuchen die Spalte, durch welche das Licht einfällt, keine grofse Breite haben darf?

Aber wozu diesen Weg durch Experimente, warum bleibt ihr nicht stehen bei der einfachen Beobachtung, fragt man. Die Antwort ist leicht. Ist ein Erkennen in irgend einem andern Gebiet möglich ohne eine geistige Wiedergeburt des Gegenstandes, den wir erst zertrümmern müssen, um seine gelösten Glieder zu einem neuen Ganzen wieder zu verbinden? Haben die Griechen, so vertraut mit der Erscheinung des Gewitters, wohl daran gelernt, was Electricität sei, erkannten sie etwa darin das Walten der ψυχή, welche Thales dem Bernsteine zuschrieb, oder fand nicht erst Wall das Rechte? der, als er das erste knisternde Fünkchen an einem geriebenen Körper bemerkte, ausrief: dies scheint mir einigermafsen Donner und Blitz vorzustellen. Erfährt man etwas Wesentliches vom Lichte, wenn man starr in die Sonne sieht? Und was sind aufserdem unsere complicirtesten Versuche anders, als Erscheinungen, welche die Natur selbst hervorbringt? Ist nicht der Regenbogen ein prismatischer Versuch, das Auge eine Camera obscura mit einer aplanatischen Linse bester Form, die Perlenmuttermuschel ein Reflexionsgitter, kann man die Augen niederschlagen, ohne durch die dioptrischen Gitter der Augenwimpern Beugungsspectra zu erzeugen? Ist nicht in dem blauen Himmelsgewölbe ein Polarisationsspiegel ausgespannt von der mächtigsten Wirkung, ja hat nicht in den idio-

cyclophanischen Krystallen die Natur die Gesetze der krystallographischen Optik im voraus entwickelt, ehe noch ein Auge sie wahrgenommen?

Diese Bemerkungen werden denen nicht überflüssig erscheinen, welchen bekannt ist, wie dem unbefangenen Publikum gegenüber oft über das Bedeutendste abgesprochen wird. Wenn wir Deutschen uns mit Recht etwas darauf wissen, dafs die aus deutschen Werkstätten hervorgehenden optischen Instrumente selbst auf den Sternwarten des Auslandes immer allgemeiner werden, so werden wir uns Frauenhofer'n verpflichtet fühlen, und die vorbereitenden Versuche über die festen Linien des Spectrums, welche dies möglich gemacht haben, wenigstens als für die Praxis wichtig anerkennen. Erinnern wir uns aber, dafs an diese Versuche sich die theoretischen Untersuchungen anknüpften, durch welche Cauchy die Dispersion endlich theoretisch abgeleitet hat, dafs sie es sind, durch welche der Weg zur Erläuterung der paradoxesten Absorptionserscheinungen durch Wrede wenigstens entschieden angedeutet ist, so wird die Frage erlaubt sein, ob denn wirklich »das ganze Kunststück dieses Experiments darin bestehe, dafs zu den complicirten Bedingungen des Newton'schen Versuches noch ein Paar hinzugefügt werden, wodurch das Hocuspocus sich noch mehr verwickelt? [1])« Goethe sagt irgendwo: das schädlichste Vorurtheil ist, dafs irgend eine Art Naturuntersuchung mit dem Banne belegt werden könnte. Ob er sich wohl dieser Worte erinnerte, als er jene schrieb? Doch genug zur Rechtfertigung unsers Weges. Wir wollen die Erscheinungen selbst reden lassen.

[1]) Goethes Werke 50, p. 189.

Betrachten wir eine Weingeistflamme, deren Docht mit Salz eingerieben ist, durch ein gleichseitiges Flintglasprisma, so sehen wir an das vollkommen scharf begrenzte, abgelenkte Bild dieser Flamme eine breite, blaue Lichtmasse sich anschliefsen, die an der Grenze des Gelben grün wird. Wir halten ein braungelbes Glas vor dieses abgelenkte Bild oder direct vor die Flamme, und sehen nun jene blaue Lichtmasse nicht mehr; die durch das Prisma abgelenkte Flamme erscheint dem Auge ganz so einfach gelb und unverändert an Gestalt, als die mit bloſsem Auge betrachtete. Das Licht dieser Flamme können wir verbunden mit jenem Glase monochromatisch nennen, denn die Feder eines ostindischen Raben, auf der einen Seite prachtvoll blau, auf der andern intensiv roth, erscheint in seiner Beleuchtung so vollkommen schwarz, daſs jeder, dem sie in die Hand gegeben wird, eine schwarze Rabenfeder zu halten glaubt und seinen Augen miſstraut, wenn er beim Anzünden eines Wachslichtes an der gelben Flamme jenes glänzende Roth nun plötzlich aufflammen sieht. Ja es ist bei den eben anzuführenden Versuchen das Vorhalten jenes Glases nicht einmal nöthig, das directe Licht der Lampe zeigt schon die Erscheinungen in voller Deutlichkeit. Betrachten wir eine Seifenblase in dieser Beleuchtung, so sehen wir sie ganz bedeckt mit abwechselnd hellen und dunkeln Streifen, die, je ruhiger die Blase steht, sich der Kreisform immer mehr nähern, und sich auf den Aufhängungspunkt als Mittelpunkt beziehen. Eine Seifenblase ist nichts anderes, als ein dünnes Wasserhäutchen, dessen Dicke am Aufhängungspunkte am geringsten ist. Diese Dicke nimmt durch Abflieſsen so lange von oben nach unten zu, bis das sich unten stets vergröſsernde Tröpfchen zuletzt die Blase zerreiſst. Scherben einer bis zum Zer-

springen aufgetriebenen Glasblase zeigen genau dieselbe Erscheinung. Legen wir auf ein Planglas eine schwach sphärisch gekrümmte Linse, so begrenzen wir zwischen beiden Gläsern eine Luftschicht, welche vom Berührungspunkte ab nach aufsen hin regelmäfsig an Dicke zunimmt. Die nun entstehenden concentrischen Ringe sind vollkommene Kreise, immer dichter und zarter, je weiter vom Mittelpunkt, einige hundert unterscheidbar. Ist die obere Fläche cylindrisch, so werden die dunkeln Streifen geradlinig, sie sind elliptisch, wenn man eine sphärisch gekrümmte Linse mit einer cylindrischen verbindet. Daraus folgt unmittelbar, dafs der Abstand beider Gläser von einander in allen Punkten desselben dunkeln Streifens derselbe ist. Aus der bekannten Krümmung des sphärischen Glases und dem Messen der Durchmesser der dunkeln Kreise, läfst sich leicht bestimmen, wie weit bei jedem einzelnen Streifen die Gläser von einander abstehen. Dieser Abstand ist nämlich gleich dem Quadrate des Halbmessers dieses dunkeln Ringes, dividirt durch den Durchmesser der Krümmung des convexen Glases. Nennt man nun den Abstand der Gläser im ersten dunkeln Ringe, vom Mittelpunkte an gezählt, $a$, so ist dieser Abstand im zweiten das Doppelte dieses $a$, im dritten das Dreifache u. s. f., im hundertsten Ringe das Hundertfache des ersten. In der Mitte der hellen dazwischenliegenden Streifen sind hingegen die Abstände $^1/_2\ a$, $^3/_2\ a$, $^5/_2\ a$, $^7/_2\ a$, $^9/_2\ a$ u. s. f.

In Beziehung auf den Anblick der Ringe folgt daraus unmittelbar, dafs die Quadrate der Halbmesser der auf einander folgenden hellen Ringe sich wie die Zahlen 1. 3. 5. 7. zu einander verhalten, die Quadrate der Halbmesser der dunkeln Ringe hingegen, wie die Zahlen 0. 2. 4. 6. 8. Die Ringe rücken daher, je weiter vom Mittelpunkt, desto näher

an einander. Bezeichnet man nämlich den Durchmesser des ersten hellen Ringes in irgend einer homogenen Farbe mit 1, so müssen die Abstände der einzelnen hellen Ringe von einander die Unterschiede der Quadratwurzeln der auf einander folgenden ungeraden Zahlen sein d. h. 0.73205, 0.50402, 0.40968, 0.35425, 0.31663, 0.28892, 0.26743. Bei dem 50sten Ringe beträgt dieser Abstand nur noch 0.09902.

Wir betrachten nun dieselbe Erscheinung bei einer durch Strontian roth gefärbten Flamme, die wir auf ähnliche Weise einfarbig machen, endlich bei einer blauen. Die Erscheinung ist ganz entsprechend der vorigen, aber mit dem Unterschiede, dafs im rothen Lichte die Ringe weiter sind, als im gelben, im blauen enger. Das der Reihenfolge der natürlichen Zahlen entsprechende Verhältnifs der Abstände in den auf einander folgenden Ringen bleibt hingegen dasselbe, das Unterscheidende ist nur, dafs der Abstand des ersten Ringes nicht $a$ ist, sondern $b$, und dafs dies $b$ kleiner ist bei blauem Licht, als das $a$ des gelben, und noch kleiner, als die Einheit der rothen Ringe. Um diese Veränderungen recht auffallend zu machen, erregen wir nun ein Spectrum und bewegen die auf einander liegenden Gläser von dem rothen Ende desselben allmählig zu den violetten hin. Die Ringe verengern sich continuirlich. Bezeichnet $d$ den Durchmesser irgend eines hellen Ringes, also z. B. des 10ten vom Mittelpunkt an gerechnet, in dem äufsersten Roth des Spectrums, so ist dieser Durchmesser an der Grenze des Orange und Roth 0.96150, dieses $d$ an der Grenze des Orange und Gelb 0.94104, an der Grenze des Gelb und Grün 0.90856, zwischen Grün und Blau 0.87358, zwischen Blau und Indigo 0.84343, zwischen Indigo und Violett 0.82548, an der äufsern Grenze des Violett endlich 0.79370.

Nennt man demnach 1. die Dicke der Luftschicht in dem rothen Ringe, so ist diese für die auf einander folgenden eben angeführten Stellen des Spectrums 0.9243, 0.8855, 0.8255, 0.7631, 0.7114, 0.6814, 0.6300, oder ausgedrückt in Milliontheilen des englischen Zolles und gültig für den ersten Ring 6.344, 5.866, 5.618, 5.237, 4.841, 4.513, 4.323, 3.997. Läfst man demnach das Spectrum durch Drehung des Prismas über die auf einander gelegten Gläser sich fortbewegen, so ziehen sich die Ringe in der Weise zusammen, dafs im äufsersten Roth der innere Ring bei einer Dicke von 6.344 Milliontheilen eines Zolles entsteht, im äufsersten Violett hingegen schon bei der Dicke von 3.997. Endlich beleuchten wir die Ringe durch eine dichromatische Flamme, d. h. wir lassen ein weifses Licht durch ein starkes, mit Kobalt gefärbtes, tief violettes Glas scheinen, welches, mit einem Prisma betrachtet, einen von dem rothen Bilde der Flamme durch einen breiten, schwarzen Raum getrennten, blauen Fleck zeigt. Wir sehen nun dieselbe Erscheinung, als wenn wir das rothe Ringsystem zugleich mit dem blauen vor uns hätten, oder als wenn wir, indem wir das eine System wahrnehmen, durch dasselbe hindurch zugleich das andere erblickten. An manchen Stellen fallen die rothen, hellen Ringe auf die dunkeln Streifen der blauen, an andern die hellen Ringe beider über einander, wir sehen daher Abwechselungen von rothen, blauen und schwarzen Ringen mit allen Nuancirungen des dazwischenliegenden Violetten. Endlich beleuchten wir unsern Apparat durch eine weifse Flamme, und nun haben wir genau dieselbe Erscheinung, als wenn wir das, was wir nach einander sahen, als wir den Apparat durch das Spectrum hindurchführten, gleichzeitig an derselben Stelle wahrnehmen, die Farben-

nuancen sind aber so mannigfach, dafs auch das geübteste Auge jene einfache Folge nicht wieder heraus erkennen würde. Dennoch können wir sie wieder darstellen. Halten wir nämlich vor das jene complicirte Erscheinung betrachtende Auge ein einfach rothes Glas, so sehen wir wieder an derselben Stelle genau dieselben Abwechselungen heller und dunkler Ringe, wie bei der Beleuchtung der rothen Flamme, oder im rothen Ende des Spectrums, und ganz dasselbe gilt für jedes andere homogen farbige Medium, welches wir zwischen dem Auge und den die Farbenringe erzeugenden Gläsern einschalten.

Befindet sich zwischen den beiden Gläsern eine stärker brechende Substanz als Licht, z. B. Wasser, so werden die Ringe bei gleichbleibendem Abstande der Platten enger. Man kann sich davon am einfachsten überzeugen, wenn man die Planscheibe nur theilweise sehr wenig benetzt. Die Ringe erscheinen dann da, wo das Wasser durch ein Luftbläschen unterbrochen wird, plötzlich abgesetzt, und zwar entspricht der Farbenbogen an dieser Stelle einem gröfseren Radius. Bei Luft und Wasser ist das Verhältnifs der Radien 8 : 7, die gleiche Farbe gebenden Dicken der Luftschichten und Wasserschichten verhalten sich daher wie 64:49, also nahe wie 4:3, welches das Brechungsverhältnifs des Lichtes bei seinem Austritt aus Luft in Wasser ist. Dieses von Newton gefundene Gesetz gilt allgemein.

An den Stellen, wo wir im reflectirten Lichte dunkle Streifen wahrnehmen, sehen wir helle im durchgelassenen und umgekehrt. Bei weifsem Lichte sind die durchgelassenen farbigen Ringe die complementaren der gespiegelten.

Die Farbenfolge der reflectirten Newton'schen Ringe im weifsen Licht ist nach Newton und Biot folgende:

1. Schwarz, weifsliches Himmelblau, mattes Silberweifs, Strohgelb, Orange, Roth von *geranium sanguineum.*
2. Violett (Jod), Indigo, Kobaltblau, Grün (Aquamarin), Citronengelb, Orange, Hellroth (*œillet de mai*), Blutroth.
3. Purpur (Flachsblüthe), Indigo, Berliner Blau, Grasgrün, weifsliches Gelb, Rosenroth, bläuliches Roth.
4. Bläuliches Grün, Smaragdgrün, gelbliches Grün, blafs Rosenroth.
5. Bläulich Grün, blafs Rosa.
6. Bläulich Grün, sehr blasses Rosa.
7. Sehr blasses bläulich Grün, und Rosa in Weifs übergehend.

Die Farbenfolge der durchgelassenen hingegen:

1. Weifs, gelbliches Roth, Schwarz, Violett, Blau.
2. Weifs, Gelb, Roth, Violett, Blau.
3. Grün, Gelb, Roth, bläulich Grün.
4. Roth, bläulich Grün.
5. Roth.

Da die durchgelassenen Ringe sehr viel schwächer sind, als die reflectirten, so lassen sich in ihnen weniger Farbennuancen unterscheiden.

Da die Erscheinung dieselbe ist, wenn die Planscheibe auf der sphärischen Linse liegt, wie wenn diese auf jener sich befindet, so wollen wir zur deutlichen Uebersicht des Phänomens die erste Ansicht wählen. Alles Licht, welches aus der untern Fläche der Planscheibe in den Zwischenraum dringt, mufs gleichartig sein, da es von derselben Quelle ausgehend, auf seinem Wege denselben physikalischen Bedingungen unterworfen ist. Nachdem es aber diesen Zwischenraum durchlaufen hat (sei er von irgend einer Materie erfüllt oder leer, wie unter der Luftpumpe), so zeigt sich

ein Unterschied im Lichte, je nachdem nämlich der durchlaufene Raum um ein ungerades Vielfaches einer gewissen Länge ($\frac{1}{2}$ *a*) gröfser ist, oder um ein gerades Vielfaches derselben. Wie diese Erscheinung auch gedeutet werden möge, das bleibt immer durch Erfahrung festgestellt, dafs das Licht, wenn wir es uns als fortschreitend denken, jetzt die Eigenschaft besitzt, etwas zu thun, dann das Entgegengesetzte, dann wieder das Erste u. s. f. Die wiederkehrenden gleichartigen Zustände und ihre zwischenfallenden Gegensätze liegen bei den verschiedenen Farben um ungleiche Grölsen auseinander. Es mufs also irgend ein Zusammenhang stattfinden zwischen dieser Periodicität und dem Bewufstwerden des Eindrucks einer bestimmten Farbe.

Newton fühlte wohl, welchen grofsen Fund er gethan, als er jene Beobachtung machte: *Observavi circulos, quos exhibebat lumen rubrum manifesto majores esse quam quos exhiberet lumen caeruleum ac violaceum, magnaque voluptate perfusus, videbam eos dilatare aut contrahere se gradatim, pro eo ac color luminis immutabatur* [1]).

Man hört sehr oft die Bemerkung, dafs die Naturforscher zu schnell von der Beobachtung der Phänomene zu ihrer Erklärung übergehen, da doch ihre eigentliche Aufgabe nur sei, die Grunderscheinungen als beobachtete Facta auszusprechen. Wenn dies richtig ist, so hat Newton hier so gehandelt. Er sagt: ich finde am Lichte periodische Anwandlungen, in das Innere eines Körpers einzudringen, oder von ihm reflectirt zu werden, er nennt sie so, sie sind ihm Dispositionen, die er nicht weiter erläutert [2]). Welche Früchte

[1]) Optice libr. II. obs. §. 13.

[2]) Ea autem actio sive dispositio ita propagatur, ut aequis perpetuo intermittat et revertatur intervallis. Efficit enim in omni

hat diese Resignation getragen? Dafs Ignoranten, die nie eins der Phänomene, von denen hier die Rede ist, gesehen haben, ja nicht einmal davon gehört, über die Absurdität der Annahme solcher Anwandlungen von vorn herein mitleidig die Achseln zucken, ist ganz in der Ordnung, denn dazu sind sie da, sich zur Freude und andern zum Amusement. Davon ist nicht die Rede. Dafs aber Newton ein solches Problem ohne den Versuch einer Lösung seinen Nachfolgern überliefs, war ein Unglück für die Wissenschaft. Wer sollte sich an eine Aufgabe wagen, die er auf diese Weise aufgegeben hatte? Thomas Young, dem Entzifferer der Hieroglyphen, war es vorbehalten, auch dieses Räthsel zu lösen.

Im Jahre 1665 sprach Grimaldi [1]) (*Physico mathesis de Lumine Coloribus et Iride prop.* 22. p. 187.) zuerst den kühnen Satz aus: »Licht hinzugefügt zu einer bereits

progressu suo, ut radius, certa interjecta distantia a prima superficie reflectatur ex secunda, idque aequalibus intervallis et per innumeras vices. Denique, quoniam haec dispositio radii ita est comparata, ut is reflectatur in distantiis 1. 3. 5. 7. 9., transmittatur autem in distantiis 0. 2. 4. 6. 8. 10., ideo dispositio ea, qua fit ut radius transmittatur in distantiis 2. 4. 6., existimanda est reversio ejusdem dispositionis, quam habebat is initio in distantia 0., hoc est, cum transmitteretur per primam superficiem refringentem. Actio autem haec sive dispositio, qualis tandem sit; utrum consistat in motu quodam circulatorio, an vibratorio, radii ipsius vel etiam medii, an plane alia aliqua ex causa pendeat, in id vero ego hic non inquiro. Satis habebo, illud ipsum jam invenisse. Optice libr. II. p. 3. prop. 12.

[1]) Lumen aliquando per sui communicationem reddit obscuriorem superficiem corporis aliunde ac prius illustratam. Haec propositio paradoxum est, et ex terminis ipsis magnam prae se fert improbabilitatem, quia luminis est illustrare, non autem obscurare superficiem corporis opaci, ad quam terminatur, et cui aliquo tandem modo se communicat.

beleuchteten Fläche, macht diese mitunter dunkler, als vorher. Diese Behauptung, fügt er hinzu, scheint paradox, ja in ihren Worten sogar eine grofse Unwahrscheinlichkeit zu enthalten, weil eben das Wesen des Lichtes darin besteht, die Oberfläche eines dunkeln Körpers, zu dem es gelangt, und dem es sich auf irgend eine Weise mittheilt, zu erleuchten, nicht zu verdunkeln. Von ihr läfst sich aber der sicherste und unleugbarste Beweis durch einen einfachen Versuch geben, der aber von Niemand, so viel ich weifs, bisher angestellt worden ist.« Anderthalb Jahrhunderte vergingen, ehe es gelang, an die Stelle dieses »mitunter« die Bedingungen anzugeben, unter welchen diese Verdunkelung eintritt. Da zeigte im Jahre 1802 Young [1]), dafs, wenn Licht zu Licht hinzugefügt wird, dies nur dann eine im Verhältnifs beider Intensitäten gröfsere Helligkeit gebe, wenn der Gangunterschied der beiden zusammentreffenden Strahlen ein ganzes Vielfaches einer bestimmten Länge ist, dafs hingegen, wenn derselbe ein ganzes Vielfaches der Hälfte dieser Länge ist, beide Strahlen einander vollkommen auslöschen. Diese für die verschiedenen homogenen Farben verschiedene Länge heifst Wellenlänge oder Undulationslänge. Es bedarf wohl kaum der Erwähnung, dafs das, was Newton Anwandlungen genannt hat, mit dem, was die neuere Wellenlehre eine Viertel Undulation nennt, identisch ist, oder mit andern Worten, dafs die Wellenlängen der verschiedenen

[1]) An account of some cases of the production of colours. Phil. Trans. 1822. »wherever two portions of the same light arrive at the eye by different routes, either exactly or very nearly in the same direction, the light becomes most intense, when the difference of the routes is any multiple of a certain length, and least intense in the intermediate state of the interfering portions; and this length is different for light of different colours.«

Farben übereinkommen mit den vierfachen Längen der Anwandlungen. Da nämlich Newton unter Anwandlungen sowohl die Disposition zu leichterer Reflexion als zu leichterer Refraction versteht, so tritt bei ihm die Rückkehr desselben Zustandes ein, wenn das Lichttheilchen sich um die doppelte Länge einer Anwandlung weiter bewegt hat. Da aber die Interferenzerscheinungen bei den reflectirten Newton'schen Ringen an der Vorderfläche der die Gläser trennenden Luftschicht entstehen, und zwar durch Zusammenwirken des Lichtes, welches gar nicht in die Schicht eingedrungen ist, und des Lichtes, welches von der untern Begrenzungsfläche reflectirt, diese Schicht zweimal durchlaufen hat, so mufs die periodische Wiederkehr desselben Zustandes die doppelte von der sein, welche Newton ihr zugeschrieben hat, der die Erscheinung nach einmaligem Durchgang des Lichtes durch die Schicht an der Hinterfläche derselben untersuchte, die Wellenlänge also das Vierfache der Anwandlung. Nach den Messungen von Newton ist, wie (p. 43.) gezeigt wurde, die Länge der Anwandlungen für das äufserste Roth 6.344, für das äufserste Violett 3.997 Milliontheile eines englischen Zolles. Die Newton'schen Messungen geben also für die Farben an den Grenzen zwischen Roth, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo und Violett folgende Wellenlänge: 25.376, 23.464, 22.472, 20.948, 19.364, 18.052, 17.292, 15.988, vom Roth bis Violett, wofür wir später die neuern schärfern Bestimmungen mittheilen werden.

Wenn man die ungeheure Kluft bedenkt, welche die Ansichten der jetzigen Physiker über das Licht von den Vorstellungen trennt, welche sich Goethe darüber gebildet hatte, so ist es um so erfreulicher anzuerkennen, dafs Goethe Newton gegenüber eine dunkele Ahnung von dem Richtigen

hatte. Der Nerv seiner Betrachtung besteht in der Anerkennung von Doppelbildern und ihrer Wirkung auf einander. Er beginnt damit, auf die beiden Bilder aufmerksam zu machen, welche von der Vorder- und Hinterwand eines Spiegels entstehen, aber dies ist ihm nur ein Gleichnifs, ein Analogon, um die prismatischen Versuche auf ein einfaches Schema zurückzuführen. Young geht auch von denselben Doppelbildern aus, aber er beweifst an ihnen das wahre Urphänomen der optischen Erscheinungen: die Interferenz, er zeigt, dafs an der Vorderfläche jener trennenden Luftschicht darum Dunkel entsteht, weil das von der Hinterfläche reflectirte Licht, zusammentreffend mit dem von der Vorderfläche reflectirten, dieses auslöscht, dafs hingegen beide ihre Wirkung addiren, wenn das Licht des Nebenbildes auf einem etwas längern Wege zu dem Lichte des Hauptbildes gelangt. Dieses Aufeinanderwirken zweier Bilder war, als Goethe seine Farbenlehre publicirte, das bereits seit 8 Jahren innerhalb der Wissenschaft ausgesprochene, wenn auch nicht am Detail aller Erscheinungen geltend gemachte Princip; er stand also dem damaligen Entwickelungsgange der Wissenschaft nicht so fern, als er glaubte; statt sich aber ihm anzuschliefsen, oder wo möglich seiner zu bemächtigen, beruhigte er sich in der ewigen Wiederholung seiner Erklärung der Himmelsbläue, deren Unrichtigkeit sich beweisen läfst.

Es ist leicht einzusehen, dafs so wie die Interferenzphänomene des gespiegelten Lichtes in dem angeführten Versuche durch das Zusammentreffen des äufserlich gespiegelten Lichtes mit dem innerlich gespiegelten entstehen, so die des durchgelassenen durch Zusammentreffen des direct hindurchgehenden mit dem zweimal innerlich gespiegelten bedingt

werden. Wegen der grofsen Verschiedenheit der Intensität des direct durchgelassenen und des zweimal im Innern der Schicht gespiegelten Lichtes kann die Interferenz hier nicht vollständig sein. Die im weifsen Licht durchgelassenen Ringe sind daher der Farbe nach complementar, der Intensität nach aber sehr viel schwächer als die reflectirten. Es bedarf nur noch des Beweises, dafs die periodischen Zustände des Lichtes sich nicht auf Spiegelung und Brechung als Gegensätze beziehen. Die Newton'sche Vorstellung der Anwandlungen fällt weg, wenn die zusammentreffenden Lichtmengen entweder beide gespiegelt, oder beide gebrochen sind, endlich wenn directes mit gespiegeltem, oder gebrochenem zusammentrifft, denn dann kann von einer Wahl des Lichtes zwischen Spiegelung und Brechung nicht mehr die Rede sein.

Bei der Darstellung der Newton'schen Farbenringe, deren richtiger Erklärung schon Hooke [1]) nahe war — der

[1]) On the colours observable in muscowy glass and other thin bodies. Micrographia obs. IX. Nach Hooke entsteht der Eindruck des Blau durch einen Impuls auf die Netzhaut, dessen schwächerer Theil vorangeht, dessen stärkerer folgt, der des Roth hingegen durch einen Impuls, bei welchem der stärkere Theil dem schwächern vorangeht. Seine Erklärung ist nun folgende: fällt Licht auf einen sehr dünnen durchsichtigen Körper mit zwei spiegelnden Flächen, so wird ein Theil an der äufsern Fläche reflectirt, ein Theil an der innern, und kehrt nach zwei Brechungen ins Auge zurück. Dadurch wird er geschwächt (a kind of fainter ray, whose pulse is not only weaker by reason of the two refractions but by reason of the time spent in passing and repassing between the two surfaces. Da dieser schwächere Impuls wegen der Nähe der beiden reflectirenden Flächen so schnell dem stärkern von der Vorderfläche folgt, dafs sie nicht von einander unterschieden werden können, so erhält die Netzhaut einen Eindruck, wo der schwächere Theil dem stärkeren folgt, wir also durch den optischen Nerv die Vorstellung von Gelb. Wird hingegen die dünne Schicht allmählig dicker, so

aber hier, wie anderwärts, seine dunkeln Vorstellungen von Interferenz nicht bis zum klaren Bewufstsein durchzuarbeiten vermochte und daher im Gebiete des Lichtes, wie in der Mechanik des Himmels, sich stets von seinem Nebenbuhler Newton verdunkelt sah — bei dieser Darstellung also liegen die beiden Spiegel über einander, so dafs das Licht, um zum zweiten zu gelangen, den ersten durchdringen mufs. Fresnel legt die beiden Spiegel in einem sehr stumpfen Winkel neben einander [1]). Da Licht von einem ebenen Spiegel so reflectirt wird, als wenn es von einem Punkt ausginge, der so weit hinter dem Spiegel liegt, wie der leuchtende Punkt vor ihm, so werden die von beiden Spiegeln reflectirten Strahlen sich in Beziehung auf Länge und Richtung so verhalten, wie die von zwei Punkten ausgehenden Strahlen. Die Durchschnittspunkte der Strahlen zweier ebenen Strahlenbüschel liegen aber in einer auf ihrer Verbindungslinie senkrechten Geraden, wenn ihr Abstand von beiden Punkten gleich ist, hingegen in Hyperbeln, wenn der Unterschied der Abstände von beiden strahlenden Punkten gleich ist. Bei dem Fresnel'schen Experimente sieht man nun jene gerade Linie hell und zu beiden Seiten eingefafst von abwechselnd dunkeln und hellen Hyperbeln, welche die Orte jener Bilder zu ihren gemeinsamen Brennpunkten haben. Der Unterschied der Abstände jedes Punktes einer solchen

nähert sich der schwächere Impuls dem folgenden stärkern so, dafs er diesem voranzugehen scheint und man sieht blau (if the two surfaces yet further removed asunder, then will the weaker impulse be so far behind, that it will be more then half the distance, and in this case it will rather seem to precede the following stronger pulse, then to follow the preceding one, and consequently a blue will be generated).

[1]) Supplement à la chimie de Thomson.

Hyperbel von jenen beiden Brennpunkten ist für die hellen Hyperbeln ein ganzes Vielfaches der Wellenlänge der angewendeten Farbe, für die dunkeln Hyperbeln hingegen ein ganzes Vielfaches der halben Wellenlänge. Die Unterschiede der einander schneidenden Strahlen in den auf einander folgenden Hyperbeln bilden also ebenso hier die Aufeinanderfolge der natürlichen Zahlen, wie bei den Newton'schen Farbenringen die Längenunterschiede der an der Vorderfläche einander treffenden reflectirten Strahlen. Bedeckt man den einen Spiegel, so verschwinden die entstandenen dunkeln und hellen Linien oder am weifsen Licht die Farbensäume vollkommen. Es bedarf also des Zusammentreffens von zwei Lichtmassen zur Hervorbringung dieser Erscheinungen.

Grade so wie mit zwei Mengen gespiegelten Lichtes, kann der Versuch auch mit zwei Mengen gebrochenen Lichtes angestellt werden. Statt das Licht von einem sehr stumpfen Winkelspiegel zu reflectiren, läfst man es durch ein sehr stumpfes Prisma (ein Interferenzprisma) brechen, und somit ist jene Fundamentaleigenschaft erwiesen.

Licht, welches vor einem Spiegel parallel vorbeigeht, interferirt ganz ebenso mit dem sehr schief davon reflectirten, nach den Versuchen von Lloyd [1]) und von Ettinghausen [2]).

Ist das dünne, durchsichtige Häutchen, welches den untern Spiegel bedeckt, überall gleich dick, so ist die Farbe überall gleich. Man sieht leicht, warum ein im weifsen Licht intensiv rother Körper in einer andern Beleuchtung vollkommen dunkel erscheinen kann, wenn die durchsichtige Schicht grade die Dicke hat, für welche die einander schneidenden

[1]) Trans. of the Irisch Acad. v. 17. 1834.

[2]) Pogg. Ann. 45. p. 97.

rothen Strahlen coincidiren, d. h. ihre Helligkeit verstärken, während sie für die andere Beleuchtung interferiren. Die prachtvollen Farben, welche Nobili [1]) durch galvanisches Anlaufen des Stahls hervorgebracht hat, gehören hierher. Auch erklären sich auf ähnliche Weise, wie die Farben dünner Blättchen, die Farben der sogenannten dicken Platten, wie sie in den verschiedenen Combinationen von Spiegeln und Gläsern bei den Versuchen von Newton [2]), dem Herzog von Chaulness [3]), Pouillet [4]), Brewster [5]) und Babinet [6]) hervortreten. Die Farben der dünnen Blättchen ändern sich bei verändertem Sehewinkel, denn der Weg des die durchsichtige Schicht durchlaufenden Lichtes vergröfsert sich mit der Neigung. Diese Veränderung der Dicke kann bei unverändertem Sehewinkel durch mechanischen Druck hervorgebracht werden, wie man an den Farben sieht, welche an Sprüngen im Glimmer, Gyps und Kalkspath in zarten Bändern entstehen. Wird das Licht von einem Körper reflectirt, in dessen Oberfläche regelmäfsig parallele Linien eingerissen sind, so wird das aus den Thälern zurückkehrende Licht einen längern Weg gemacht haben, als das von den stehengebliebenen Rändern reflectirte. So entstehen die irisirenden Farben der Perlenmutter. Sie lassen sich, ist der Schnitt schief gegen die Lamellen geschehen, in schwar-

[1]) Mem. ed Observationi 1. p. 18, 162, 189.

[2]) Optic. 2. lib. 2. p. 4.

[3]) Observations sur quelques expériences de la 4 partie du 2 livre de l'optique de Newton Mem. de Par. 1758. p. 130.

[4]) Elémens de physique 2. p. 478.

[5]) On a new species of coloured fringes produced by the reflection of light between two plates of parallel glass of equal thickness. Edinb. Phil. Trans. 1815.

[6]) Compt. rend. 7. p. 694. Pogg. Ann. 46. p. 472.

zem Siegellack abdrücken, weil man das künstliche Gitter überträgt [1]). Auf dieselbe Weise entstehen die prachtvollen Farben irisirender Messingknöpfe, ein Stahlgitter ist nämlich als Prägstock auf sie abgedrückt [2]).

Fällt das Licht durch feine Drahtgitter, so ist das gerade hindurchgehende kürzer, als das, welches von den Rändern sich verbreitet, da der gerade Weg directer ist, als der gebrochene. So entstehen jene glänzenden Spectra, welche Frauenhofer [3]) entdeckt und Schwerd [4]) erläutert hat. Die hyperbolischen Streifen, welche vom Rande der Körper aus ihren Schatten begleiten, gehören ebenfalls hierher. Die Farbenfolge dieser Streifen ist

im ersten: Violett, Indigo, Blafsblau, Grün, Gelb, Roth;
im zweiten: Blau, Gelb, Roth;
im dritten: Blafsblau, Blafsgelb, Blafsroth.

Bei Anwendung von homogenem Lichte sind die abwechselnd hellen und dunkeln Streifen am breitesten im rothen Licht, am schmalsten im violetten. Fällt hingegen das Licht durch eine enge Spalte, so sieht man das weifse Licht dieser Spalte

[1]) Brewster: on new properties of light exhibited in the optical phenomena of mother of pearl, and other bodies to which the superficial structure of that substance can be communicated. Phil. Trans. 1814. p. 397.

[2]) On a new series of periodical colours produced by the grooved surfaces of metallic and transparent bodies. Ph. Tr. 1829. p. 301. P. A. 18. p. 579. and Barton sur les nouvelles parures métalliques Ann. de Ch. et de ph. 23. p. 110. Gilb. Ann. 74. p. 309.

[3]) Neue Modificationen des Lichtes durch gegenseitige Einwirkung und Beugung der Strahlen und Gesetze derselben. München, 1848. und in Schumachers astronomischen Abhandlungen. Kurzer Bericht von den Resultaten neuerer Versuche über die Gesetze des Lichtes und die Theorie desselben. Gilb. Ann. 74. p. 337.

[4]) Die Beugungserscheinungen aus den Fundamentalgesetzen der Undulationstheorie analytisch entwickelt. Mannheim. 1835. 4.

durch Gelb in Orange übergehen, durch eine Anzahl Spectra, die, je weiter sie abgelenkt sind, sich der Homogeneität immer mehr nähern und an Helligkeit abnehmen, im ersten Indigo, Blau, Grün, Gelb, Roth, im zweiten: Blau, Gelb, Grün, Roth, im dritten: Grün, Roth u. s. f. Fällt das Licht durch eine runde Oeffnung, so sieht man sie umgeben mit Farbenringen, die Farbenfolge, genau die der Newton'schen Farbenringe, ist ohne den schwarzen Centralfleck. Die einfachste Art, diese Versuche anzustellen, ist folgende. Eine innen durch schwarzen Lack geschwärzte Glasröhre wird in die Sonne gelegt, und die darauf sich bildende Lichtlinie mit zwei Stahlschneiden betrachtet, welche man vermittelst einer Schraube einander beliebig nähern kann. Um die Farbenringe zu erhalten, sticht man in ein Staniolblättchen ein feines Loch und betrachtet durch dasselbe den Lichtpunkt auf einer in der Sonne liegenden Thermometerkugel oder einem mit Lack geschwärzten Uhrglase. Um die Erscheinungen mit gröfserer Schärfe zu beobachten, wendet man ein Fernrohr an. Der von Schwerd angefertigte Apparat zeigt sie in gröfster Vollendung. Dafs die Farbenphänomene, die im Schatten eines Haares, oder feinen Drahtes hervortreten, wenn diese im divergirenden Lichte betrachtet werden, nicht gebeugtes Licht sind, wie Newton glaubte, sondern aus dem Zusammenwirken zweier Lichter entstehen, geht daraus klar hervor, dafs sie verschwinden, so wie ein Rand verdeckt wird. Sie verschieben sich, wenn man den einen Rand durch eine durchsichtige Glasplatte verdeckt [1]). Aus der Richtung des Verschiebens kann man unmittelbar schliefsen, ob die Geschwindigkeit des Lichtes im Glase gröfser oder kleiner

[1]) Arago sur un phénomène remarquable, qui s'observe dans la diffraction de la lumière. Ann. de Chim. et de Phys. I. p. 199.

ist, als in der Luft. Nach der Emanationstheorie mufs das erste Statt finden, denn das Licht wurde ja Anziehungskräften unterworfen; nach der Wellentheorie ist das umgekehrte nothwendig. Der Versuch entscheidet für die kleinere Geschwindigkeit. Bei so entscheidenden Ergebnissen heifst es wohl: *il faut se rendre à l'évidence.*

Doppelt brechende Körper haben entweder eine Richtung, oder zwei Richtungen, in welchen sie durchgehendes Licht nicht verdoppeln. Jene heifsen einachsig, diese zweiachsig. Polarisirtes Licht in dieser Richtung hindurchstrahlend und nach seinem Austritte den physikalischen Bedingungen unterworfen, welche, wäre es unpolarisirt, es polarisiren würden, entwickelt genau entsprechende Farbenringe, welche durch Interferenz der beiden Massen entstehen, in welche das Licht durch Doppelbrechung zerfallen ist. Vergleicht man die Farben, welche in diesem Falle Glimmerblätter von verschiedener Dicke geben, mit den Farben der Seifenblasen, oder der Farbenringe, so findet man, dafs das Verhältnifs der Stärke des Glimmerblättchens, welches eine bestimmte Farbe hervorbringt, zur Dicke der Luftschicht, welche dieselbe Farbe reflectirt, stets dasselbe ist, welches auch die Farbe sei, die entsteht [1]). Diese Bemerkung wird hinreichen, auch ohne mathematische Ableitung, zu zeigen, dafs hier dasselbe Princip wirksam ist. Ehe wir aber in das Gebiet der Polarisationserscheinungen eintreten, müssen wir uns erst von der Interferenz selbst eine nähere Vorstellung bilden.

Wenn ein Windhauch über ein Kornfeld streicht, so sehen wir eine Welle über dasselbe fortschreiten. Dieses

[1]) Biot Traité de physique expérimentale et mathématique 4. p. 317.

Fortschreiten ist aber nur ein Schein, jeder Halm biegt sich unter dem Drucke des Windes, einer nach dem andern, aber er richtet sich sogleich wieder auf, um an derselben Stelle das Spiel von Neuem zu beginnen. Ganz analog ist die Bewegung des Wassers, wenn wir auf einem ruhigen Wasserspiegel durch schnell an derselben Stelle hinter einander herabfallende Wassertropfen ein Wellensystem erregen, welches vom Erschütterungspunkte aus in concentrischen Kreisen sich verbreitet. So wie die Erregung über das Wasser fortschreitet, steigen die Tropfen im Wellenberge in die Höhe, sie senken sich dann ins Wellenthal, wie die Pflöckchen eines geöffneten Klaviers, wenn man mit der Hand schnell über die Tasten fährt. Erregt man von zwei Erschütterungspunkten aus gleichzeitig zwei Wellensysteme, so werden die concentrisch kreisförmigen Wellen des einen die des andern durchschneiden. Da, wo Wellenberge zusammenfallen, wird das Auge eine doppelte Erhöhung wahrnehmen, an der Stelle der zusammenfallenden Wellenthäler hingegen eine doppelte Vertiefung. An manchen Stellen erscheint das Wasser weder erhöht noch vertieft; durch den ankommenden Wellenberg des einen Systems wird nämlich das gleichzeitig vom andern Erschütterungspunkte her entstehende Wellenthal genau ausgefüllt. Das Wasser ist an dieser Stelle vollkommen ruhig, denn, wird ein Körper von zwei gleichen Impulsen gleichzeitig nach entgegengesetzten Richtungen getrieben, so weifs er nicht, welchem er folgen soll, er bleibt also stehen. Jene zusammenfallenden Wellenberge und jene zusammentreffenden Wellenthäler sind eine durch Coincidenz gesteigerte Wirkung, jenes Aufhören der Schwingung an andern Stellen, wo Wellenberg und Wellenthal einander begegnet, eine durch Interferenz aufgehobene. Verbinden wir die Punkte durch

Coincidenz gesteigerter Wellenbewegung, construiren wir eben so die Ruhelinien neutralisirter, so sind sie hyperbolisch gekrümmt. Dies nimmt man auf das Deutlichste wahr, wenn man, wie Weber [1]) in Göttingen zuerst gezeigt hat, in einem kreisförmigen oder elliptischen, mit Quecksilber gefüllten Gefäfse die von einem excentrischen Punkte erregten Wellen sich mit den vom Rande reflectirten durchschneiden läfst. Auch finden sich in den periodischen Anschwellungen des Meeres diesem Versuche entsprechende Beispiele. Stehen Sonne, Mond und Erde in gerader Linie (bei Neumond und Vollmond), so fällt die durch die Sonne erregte Fluthwelle zusammen mit der des Mondes, bei den Quadraturen hingegen füllt die durch die Sonne erregte Fluthwelle theilweise das durch den Mond erregte Ebbethal aus. Die Fluthen der Syzygien sind daher eine Erscheinung der Coincidenz, die Fluthen der Quadraturen ein Beispiel theilweiser Interferenz. Aber auch gleichzeitig zeigt das Meer Interferenzerscheinungen. Die im atlantischen Oceane von SW. nach NO. heraufdringende Fluthwelle spaltet sich bei Landsend in zwei Wellen, von denen die eine durch den Kanal in die Nordsee dringt, die andere den weiten Umweg um Schottland herum nimmt und nun an der Ostküste Englands von Norden nach Süden herabkommt. Beträgt die Verzögerung auf dem einen Wege sechs Stunden, so wird an der Durchkreuzungsstelle das Wasser gar nicht fluthen. Zöge man statt der von Whevell construirten Linien gleicher Fluthzeit solche Linien aufgehobener Fluthhöhe, so würden dies wirkliche Interferenzlinien werden.

Eine schwingende Saite stöfst die Luft fort nach der Richtung hin, nach welcher sie sich biegt, während auf der

[1]) Wellenlehre auf Experimente gegründet, Taf. VI.

concaven Seite sich die Luft verdünnt. Bei dem Hin- und Herschwingen werden also Verdichtungen und Verdünnungen abwechselnd auf einander folgen, welche, indem sie auf die nebenliegenden Theilchen wirken, fortschreitende Wellen erzeugen. Da aber jedes Lufttheilchen, ehe es, von der Ruhe an, einen gewissen Grad der Geschwindigkeit erreicht, alle zwischenliegenden Stufen der Geschwindigkeit durchläuft, bei jeder Stufe der Geschwindigkeit aber auf die benachbarten, unbewegten, oder weniger bewegten Theilchen wirkt, so werden zwischen den Stellen gröfster Verdichtung und gröfster Verdünnung alle Mittelstufen der Dichtigkeit sich finden. Die dichtesten Kugelschalen der fortschreitenden Tonwellen entsprechen den Wellenbergen der cylindrischen Wasserwellen, die verdünnten Kugelschalen den Wellenthälern. Die Schwingungen der Lufttheilchen sind aber longitudinal, d. h. jedes Theilchen entfernt sich im Sinne der fortschreitenden Tonwelle vom Erschütterungspunkt und kehrt dann zu seiner Stelle zurück, während bei den transversalen Wasserwellen der Tropfen sich auf der cylindrischen Wand derselben auf und ab schiebt, ohne vom Mittelpunkte des Wellensystems sich zu entfernen. Die Schnelligkeit, mit welcher ein Lufttheilchen auf das daneben liegende wirkt, ist natürlich unabhängig von der gröfsern oder geringern Anzahl der Wiederholungen dieses Aktes; bei einer oft hin und her schwingenden Saite werden daher die auf einander folgenden Kugelschalen gröfster Verdichtung und Verdünnung näher an einander liegen, als bei einer langsam schwingenden Saite. Die Gröfse der Ausbiegung der Saite bestimmt hingegen, wie vielmal dichter die Luft auf den dichtesten Kugelschalen ist, als auf den am stärksten verdünnten. So wie wir daher an Wasserwellen die Höhe der Wellen von der

Entfernung eines Wellenthales vom andern unterscheiden (was man im gewöhnlichen Leben Breite der Welle heifst, nennt man in wissenschaftlichen Betrachtungen Wellenlänge), so sondern wir bei den Tonwellen den Dichtigkeitsunterschied von der Wellenlänge, d. h. von der schnelleren oder langsameren Wiederkehr einer bestimmten Verdichtung. Jener bestimmt die Stärke des Tones, diese die Höhe desselben. Hohe Töne haben also kürzere Wellenlängen, als tiefe. Befindet sich irgendwo in der Umgebung des tönenden Körpers eine gespannte Membrane, so wird diese in isochrone Schwingungen versetzt. Eine solche Membrane ist das Trommelfell des menschlichen Ohres. Der Gröfse der Einbiegungen werden wir uns als Stärke des gehörten Tones bewufst, der Anzahl derselben in einer gegebenen Zeit als seine Höhe. Kann man nun wohl durch zusammenfallende Schwingungen ebenso Stille erzeugen, als durch Uebereinanderlegen von Wellenbergen und Wellenthälern Ruhe?

Erregt man auf einer centrisch eingespannten, quadratischen Klangscheibe den Ton, durch welchen sich der darauf gestreute Sand in ein diagonales Kreuz ordnet, so werden von den vier dadurch gebildeten, dreieckigen Räumen die einander gegenüberliegenden gleichzeitig nach derselben Seite schwingen, während die neben einander liegenden stets gleichzeitig sich nach entgegengesetzten Richtungen bewegen. Hält man nun eine in Form des Buchstaben Y gestaltete Röhre so über die Scheibe, dafs die beiden gabelartigen Oeffnungen über die gegenüber stehenden, gleichartig schwingenden Theile derselben zu stehen kommen, so geräth ein über die Oeffnung des Stieles gespanntes Goldschlägerhäutchen in lebhafte Schwingungen, welche sich durch die Bewegung des darauf gestreuten Sandes kundgeben. Hält man hingegen

jene beiden Oeffnungen über die neben einander liegenden entgegengesetzt schwingenden Räume, so bleibt das Häutchen in vollkommener Ruhe. Dieser von Hopkins [1]) neuerdings angegebene Versuch erläutert die, vor langer Zeit von mir gemachte Bemerkung, dafs, wenn man die Klangscheibe bei dem Ohre vorbeiführt, der Ton verschwindet, so wie man aus dem auf einerlei Weise schwingenden Raume über die trennende Sandlinie in den entgegengesetzt schwingenden Raum übergeht. Das Goldschlägerhäutchen in dem Versuche von Hopkins ist bei mir das Trommelfell selbst.

Noch früher hatte Vieth gezeigt (eine kleine akustische Entdeckung, Gilb. Ann. 17, p. 117.), dafs, wenn man das Ohr bei der horizontal gehaltenen Scheibe vorbei herabführt, der Ton verschwindet in dem Augenblick, wo das Ohr in die Ebene der Scheibe gelangt.

Wir werden später die bekannte Erscheinung der Schwebungen besprechen, welche durch zusammenfallende Töne entstehen, und von Scheibler [2]) an Stimmgabeln ausführlich erörtert worden sind. Hier können wir noch eines akustischen Versuches von Weber [3]) in Göttingen gedenken, wegen seines vollkommenen Parallelismus mit den früher besprochenen, sogenannten Beugungsphänomenen. Eine zum Tönen angeschlagene Stimmgabel setzt die Luft in der Weise in Bewegung, dafs die nach Innen schlagenden Zinken die Luft in dem Zwischenraume zu derselben Zeit verdichten, wo die von Aufsen sie berührende Luft in den

[1]) Ueber die Schwingungen der Luft in cylindrischen Röhren. Pogg. Ann. 44, 246. Cambridge Trans. 5. p. 231.

[2]) Der physikalische und musikalische Tonmesser. Essen 1834. 8.

[3]) Ueber Unterbrechung der Schallstrahlen in der, transversal schwingende Stäbe und Gabeln umgebenden Luft.

von jenen verlassenen Raum eindringend sich verdünnt. Es schreiten also rechtwinklig auf einander gleichzeitig Verdichtungen und Verdünnungen fort, welche sich bei ihrem Zusammentreffen so vollständig aufheben, dafs der Ton bei der Drehung der Stimmgabel um ihre Achse viermal vollständig verschwindet, wie man vielen Zuhörern gleichzeitig zeigen kann, wenn man die Stimmgabel über einem abgestimmten Fläschchen dreht. Die Flächen, in welchen der Ton verschwindet, sind ebenfalls hyperbolisch gekrümmt, genau so wie die Flächen, in welchen bei dem Fresnel'schen Spiegelversuche das Licht verschwand.

Kane [1]) hat auf Herschels Vorschlag eine Pfeife construirt, welche sich, wie der eine Insel umströmende Flufs, in zwei Arme theilt, die sich dann wieder vereinigen. Macht man den Längenunterschied dieser beiden Arme so grofs, dafs er gleich ist der halben Wellenlänge eines Tons von bestimmter Höhe, so verschwindet bei der Fortpflanzung verschiedener Töne derselben Octave durch die Pfeife nur dieser, kein anderer. Diese Erscheinung ist vollkommen analog dem, was wir bei den Farben dünner Blättchen sahen, nur geschah dort der Umweg durch das Hin und Her in derselben Schicht. Weifses Licht verhielt sich dort, wie hier das gleichzeitige Erregen vieler Töne, von denen einer interferirt und daher verstummt, während die andern coincidiren und daher vernommen werden.

Wir haben bisher die akustischen Interferenzen eines Tones mit sich selbst betrachtet, indem wir den Gangunterschied der sich durchschneidenden Wellen so einrichteten, dafs Verdichtungen in dem einen Zuge mit Verdünnungen

[1]) Case of interference of sound. Fifth Rep. of the Brit. Assoc. 1835. p. 13.

in dem andern und umgekehrt zusammenfielen. Wir können aber auch einen gegenseitigen Einfluſs von Tönen verschiedener Höhe dem Ohre bemerklich machen. Dies sind die von Scheibler an Stimmgabeln anschaulich gemachten Schwebungen.

Die Schläge zweier Uhren, von denen die eine richtige Secunden schlägt, die andere in 99 Secunden einen Schlag mehr macht, treffen alle 99 Secunden zusammen, und weichen nach dem Zusammentreffen immer mehr von einander ab, so daſs sie nach 50 Secunden am weitesten von einander abstehen, worauf sie sich einander wieder immer mehr nähern. Die Dauer eines Schlages der zweiten Uhr ist, da sie den Zeitraum von 99 " in 100 Theile theilt, $^{99}/_{100}$ ", der Unterschied zwischen den ersten beiden Schlägen daher $^{1}/_{100}$, zwischen den darauf folgenden $^{2}/_{100}$ u. s. f., um welche die langsam gehende Uhr hinter der schneller gehenden zurückbleibt. Da dieses Nachbleiben nach hundert Schlägen $^{100}/_{100}$, d. h. 1 Secunde beträgt, so wird der dann folgende Schlag der Secundenuhr sich mit dem der schneller gehenden vereinigen, und die Erscheinung auf dieselbe Weise sich nun wiederholen. Ebenso werden von Zeit zu Zeit die von zwei nebeneinander nicht ganz gleich ertönenden Körpern ausgehenden Schallwellen, wenn sie zum Ohr gelangen, bald zwischen einander fallen, bald zusammenfallen. Nur findet der Unterschied statt, daſs die Pendelschläge der Uhren alle von gleicher Beschaffenheit sind, und daher bei dem Zusammenfallen immer einen stärkern Eindruck auf das Ohr machen. Die Schwingungen der beiden tönenden Körper sind dagegen abwechselnd, die Luft verdichtende und verdünnende, und es findet daher nur abwechselnd ein stärkerer Eindruck auf das Ohr statt, wenn nämlich Verdichtungen mit Verdich-

tungen, und Verdünnungen mit Verdünnungen zusammenfallen. Bei dem Zusammenfallen ungleichartiger Schwingungen, der verdichtenden nämlich mit den verdünnenden, findet nicht allein kein stärkerer Eindruck auf das Ohr statt, sondern der Eindruck, welchen sie einzeln gemacht haben würden, hebt sich in ihrer Verbindung auf, so dafs für das Ohr eine Pause eintritt, die zwischen zwei verstärkte Eindrücke in die Mitte fällt. Das Ohr hört daher halb so viel periodische Anschwellungen des Tones, d. h. Schwebungen, als es wahrnehmen würde, wenn kein Wechsel von verdünnenden und verdichtenden Wellen stattfände. Die Zahl der Schwebungen und Pausen zusammengenommen giebt daher an, wie viel Schwingungen in einer bestimmten Zeit von dem einen tönenden Körper mehr als von dem andern vollführt werden.

Schlägt man mit einem Stocke von Oben nach Unten auf ein langes, straff gespanntes Seil, z. B. auf ein Tau, an welchem eine Fähre über einen breiten Flufs geht, so sieht man eine immer nach Unten gekehrt bleibende Ausbiegung schnell dem andern Ufer zueilen, aber nach der Reflexion am andern Ufer sogleich als eine nach Oben gerichtete Ausbiegung zurückkehren. Schickt man durch einen zweiten ebenso gerichteten Schlag dieser ersten fortschreitenden Welle eine zweite nach, so wird bei dem Begegnen der reflectirten, nach Oben gebogenen Welle mit der direct fortschreitenden, nach Unten gerichteten ein Ruhepunkt entstehen, weil entgegengesetzte Kräfte gleichzeitig das Tau in Bewegung zu setzen suchen. An diesem wie fest gewordenen Punkte reflectiren sich die Wellen, wie vorher am Ufer. Durch taktmäfsiges Aufeinanderfolgen der Schläge ist endlich das ganze Tau in stehender Schwingung wie eine Schlan-

genlinie gekrümmt, feste, ruhende Punkte zwischen entgegengesetzt schwingenden Theilen in vielfacher Aufeinanderfolge. Dies ist die Erscheinung einer zu Flageolettönen angeregten Saite mit ihren ruhenden Knotenpunkten. Von der linearen Dimension der Saite zu der tönenden Klangscheibe übergehend, müssen sich die Ruhepunkte in Ruhelinien verwandeln und so sehen wir Chladni's Klangfiguren gleichsam vor unsern Augen entstehen.

Der vollkommene Parallelismus zwischen den Interferenzphänomenen der Wellenbewegung fester, flüssiger und luftförmiger Körper mit den Erscheinungen des Lichtes läfst keinen Zweifel darüber, dafs die Fortpflanzung des letztern ähnlicher Art sei. Dieselben Bedingungen, welche die bewegten Wasserwellen zur Ruhe bestimmen, erzeugen Stille im Reiche des Tones, sie bedingen Dunkelheit im Elemente des Lichtes. Auf diesem nächtig dunkeln Grunde treten aus der Totalität des weifsen Lichtes die Farben hervor als ein Schattiges, aber dieser Schatten ist selbst eine That des Lichtes. So wie das Ohr sich der Schwingungen der regelmäfsig erschütterten Luft bewufst wird als eines Tones von bestimmter Höhe, so sage ich: Blau, wenn meine Netzhaut eine bestimmte Anzahl Schwingungen vollführt, Roth bei einer andern Anzahl. Der andauernde Lichteindruck bei sich schliefsendem Auge ist das Nach- oder Abklingen jener Schwingungen, eine allmählige Wiederkehr zu der Ruhe, deren wir uns als Dunkel bewufst sind. Das Element dieser Erscheinungen hat man Aether genannt, und so ist die Physik wieder zu der Vorstellung der Griechen zurückgekehrt; denn zu den Repräsentanten des Starren, Flüssigen und Luftförmigen in Erde, Wasser und Luft ist noch ein ätherisches Element hinzugekommen, als dessen Repräsentanten wir das

Feuer nennen können, da Licht und Wärme seine Manifestationen sind. Aber in diesem scheinbar in sich zurückkehrenden Kreislauf hat der menschliche Geist der Natur gegenüber sich tiefer erfafst, bei gleicher Bezeichnung trennt die heutige Physik von den Vorstellungen der Griechen die Kluft, welche bewufstes Erkennen von träumendem Ahnen scheidet.

Wenn man in einem dunkeln Zimmer eine elektrische Flasche entladet, so sieht man die im Zimmer befindlichen Gegenstände in voller Deutlichkeit, und dennoch ist die Dauer dieser Erleuchtung so kurz, dafs auch der am schnellsten bewegte Körper ruhend erscheint. Eine schwingende Saite scheint von diesem electrischen Lichte beleuchtet in abgelenkter Stellung unbewegt, eine in schwarze und weifse Sectoren getheilte Scheibe auf dem am schnellsten rotirenden Kreisel still zu stehen, ein ausfliefsender Wasserstrahl löst sich hingegen in eine Aufeinanderfolge einzelner Tropfen auf. Die Dauerlosigkeit, welche Wheatstone [1]) auf diese Weise am electrischen Lichte unserer Maschinen nachgewiesen hat, gilt, wie ich gefunden habe [2]), ebenso von den scheinbar viel länger anhaltendem Eindrucke flackernder Blitze. Sie sind eine Anzahl schnell auf einander folgender getrennter Entladungen, denn die rotirende Scheibe des Farbenkreisels scheint während eines Blitzes schnell nach einander an verschiedenen Stellen still zu stehen.

Betrachtet man von einem festen Punkte aus in einem kleinen senkrecht gestellten Spiegel das Bild eines entfernten Gegenstandes, so wird dieses Bild, wenn der Spiegel langsam um seine senkrechte Achse gedreht wird, in entgegengesetzter Richtung mit doppelter Winkelgeschwindigkeit seine

[1]) Pogg. Ann. 33, p. 508. und 34, p. 464.
[2]) Pogg. Ann. 35, p. 380.

Stelle ändern, bis es aus dem Gesichtsfelde tritt. Der Weg eines leuchtenden Punktes in rascher Bewegung erscheint aber wegen der Nachdauer des Lichteindruckes als eine zusammenhängende Linie. Bei einer bestimmten Drehungsgeschwindigkeit des Spiegels erblickt man also das Bild eines Punktes in Gestalt eines leuchtenden Bogens, und da jeder Gegenstand so weit hinter dem Spiegel erscheint, als er selbst vor ihm ist, so wird dieser Bogen einem Kreise angehören, dessen Halbmesser die Entfernung des leuchtenden Gegenstandes vom Spiegel ist. Leuchtet der Punkt die Zeit über, welche zwischen dem Eintritte seines Bildes in das Gesichtsfeld und dem Austritte desselben aus dem Gesichtsfelde vergeht, so wird der gesehene Lichtbogen kein Mafs für die Dauer seines Leuchtens sein. Fällt aber Anfang und Ende des Leuchtens in die Zeit, wo das Bild des Punktes innerhalb des Gesichtsfeldes erscheint, so wird die gemessene Gröfse des Bogens ein Mafs der Lichtdauer werden. Bei 800 Umläufen des Spiegels in der Secunde erschien in den Versuchen von Wheatstone dem dicht an den Spiegel gehaltenen Auge ein in der Entfernung von 10 Fufs senkrecht herabschlagender Funke ohne Ausbreitung nach der Seite als Lichtlinie, wie in einem ruhenden Spiegel. Da aber in dieser Entfernung der Bogen eines halben Grades einem Zoll, gesehen aus der Entfernung von 10 Fufs, entspricht, diese Gröfse aber hätte wahrgenommen werden müssen, so konnte die Lichtdauer des Funkens wegen der doppelten Drehungsgeschwindigkeit des Bildes nicht $\frac{\frac{1}{2}}{2.360.800} = \frac{1}{1152000}$ Secunde sei. Das Auge vermag also Gegenstände deutlich zu sehen, welche eine kürzere Zeit als den millionsten Theil einer Secunde beleuchtet wurden.

Dafs zwischen dem sinnlichen Eindruck und dem Be-

wufstwerden desselben aber eine Zeit verfliefse, scheint für das Auge dadurch erwiesen zu sein, dafs verschiedene durch häufige Beobachtungen hinlänglich geübte Beobachter dieselbe Erscheinung nicht zu gleicher Zeit wahrgenommen zu haben glauben. Der Unterschied der Zeit, welcher sich zwischen den Angaben zweier Astronomen fand, welche gemeinschaftlich Sternbedeckungen beobachteten, ist nämlich für verschiedene Beobachtungen derselben gleich, verschieden aber für verschiedene Individuen.

Hiermit scheint nun die bekannte Erfahrung zusammenzuhängen, dafs ein Eindruck auf das Auge noch fortdauert, wenn die erregende Ursache bereits zu wirken aufgehört hat, dafs wir also einer Zeit bedürfen, um uns bewufst zu werden, dafs etwas jetzt ist und nicht mehr ist. Die Anzahl der Eindrücke, deren wir uns in einer Secunde als auf einander folgend bewufst werden, ist daher eine begrenzte. Eine glühende Kohle erscheint als ein feuriger Kreis, wenn sie 7 ½ Mal in der Secunde herumgeschwungen wird [1]). Wenn wir also einen leuchtenden Gegenstand in einer Secunde 7 ½ Mal an derselben Stelle sehen, so sehen wir ihn ununterbrochen an derselben. Diese Eindrücke verschwinden von dem Maximum ihrer Stärke ab nicht plötzlich, sondern allmählig, so dafs es unmöglich ist, den Augenblick zu bestimmen, wann sie vollständig erlöschen. Giebt man nämlich einem Stück weifsen Papiers eine Kreisbewegung, jedoch keine so rasche, dafs ein vollständiger Kreis erscheint, so scheint sich das Papier zu verlängern und, ohne am hintern Ende scharf begrenzt zu sein, allmählig mit dem Grunde zusammen zu fliefsen. Halten wir daher nur die Bedingung

[1]) d'Arcy, mémoire sur la durée de la sensation de la vue in Mém. de l'Acad. de Paris 1765.

der Continuität fest, ohne ihre Gleichförmigkeit zu verlangen, so entsteht schon bei einer viel weniger häufigen Wiederholung der Eindrücke das Bewufstsein einer ununterbrochenen Dauer derselben. Am frappantesten sind in dieser Beziehung die Erscheinungen des von Paris angegebenen Thaumatrops.

Auf einer rasch drehbaren Achse befindet sich ein Blatt, auf dessen Vorderseite ein Kreis, auf der Hinterseite ein in ihn passendes Dreieck gezeichnet ist. Bei rascher Drehung sieht man das Dreieck in den Kreis eingeschrieben. Ebenso lassen sich beliebige Figuren auf diese Weise aus ihren auf Vorder- und Hinterfläche gezeichneten Theilen durch Drehung zusammensetzen. Noch überraschender ist folgender Versuch. Eine kreisrunde Scheibe, auf welcher ringförmig Worte geschrieben sind, wird horizontal befestigt. Durch ihre durchbohrte Mitte geht die Achse einer Welle, welche darunter sehr rasch gedreht werden kann. Am obern Ende dieser Achse ist eine schwarze Scheibe befestigt, so grofs, als die darunter liegende beschriebene, der sie parallel ist, und mit einem Einschnitt versehen, welcher vermittelst eines Schiebers sich beliebig erweitern läfst. Man öffnet diesen so weit, dafs von der darunter liegenden Schrift nur ein Buchstabe gesehen wird. Dreht man nun die obere schwarze Scheibe über der ruhenden weifsen, so werden nach einander alle Buchstaben einzeln durch den Einschnitt sichtbar. Bei einer bestimmten Drehungsgeschwindigkeit sieht man die Schrift vollständig. Dieser Versuch bildet den unmittelbaren Uebergang zu den merkwürdigen Täuschungen der stroboskopischen Scheibe. Statt einer Oeffnung, welche über verschiedene Buchstaben geht, läfst man verschiedene Oeffnungen bei dem Auge vorbeigehen, und erblickt in dem vorgehaltenen

Spiegel die unter der jedesmal vorbeigehenden Oeffnung gezeichnete Figur. Da nun diese Figuren die verschiedenen Stadien der Bewegung eines Körpers darstellen, so glaubt das Auge durch das Aneinanderreihen der schnell an derselben Stelle auf einanderfolgenden Eindrücke ein und denselben Körper in der Bewegung selbst begriffen zu sehen. Rotirende Cylinder, auf ähnliche Weise durchbohrt, gewähren den Vortheil, dafs die durch die Drehung an ihnen wahrzunehmenden Erscheinungen von mehreren zugleich beobachtet werden können, und zu ihrer Entstehung ein Spiegel nicht erfordert wird.

Es giebt noch eine Menge anderer Erscheinungen, welche auf dieser Eigenschaft des Auges, eine dauernde Nachwirkung des empfangenen Eindrucks zu empfinden, beruhen. So verschwinden die Speichen eines Rades bei rascher Drehung, die bei der Ruhe unsichtbaren Wimpern der Infusorien werden bewegt eine kleine sichtbare Fläche, eine tönende Saite erscheint als ein durch Rotation entstandener Körper und die glänzenden Knöpfchen des Kaleidophon bilden in anmuthigen Verschlingungen die mannigfachsten Figuren. Drehen sich zwei in parallelen Ebenen befindliche helle, etwa aus weifsem Papier geschnittene krumme Linien vor einem dunkeln Hintergrunde mit grofser, aber in der Weise verschiedener Geschwindigkeit, dafs die der einen ein ganzes Vielfaches der Geschwindigkeit der andern ist, so entsteht aus den scheinbaren Durchschnittspunkten beider Linien das unbewegte Bild einer dritten krummen Linie, welche dunkler ist, als der wie mit einem Schleier überzogene Grund, auf welchem sie erscheint, insofern das Auge nämlich an der deckenden Stelle nur das Licht von der einen Linie empfängt, während es an den übrigen Stellen in derselben Zeit jedesmal die

Eindrücke beider Curven nach einander erhält. Analog diesen von Plateau angegebenen Erscheinungen sind die von Faraday an den Zähnen paralleler Räder, die nach entgegengesetzten Richtungen sich drehen, beobachteten Phänomene. Ist die Geschwindigkeit des einen die doppelte der Geschwindigkeit des andern, so erscheint nach der Richtung der Achse gesehen ein stehendes Rad mit der doppelten Anzahl der Zähne. Ein einfaches Beispiel solcher ruhender Curven zeigt sich auch bei der Vorrichtung der Centrifugalmaschine, durch welche man die Abplattung der Erde anschaulich macht. Die Zwischenräume der elastischen Bänder, welche bei der Ruhe sphärische Zweiecke bilden, erscheinen als meridianartige helle Bänder bei der Rotation, entstehend durch den Durchschnittspunkt eines Streifens, welcher dem Auge seine convexe Seite zukehrt, mit einem, welcher die concave ihm zuwendet. Rogets Bemerkung, dafs die Speichen eines hinter einem ruhenden Gitter schnell dahin rollenden Rades gekrümmt erscheinen, gab die Veranlassung zu der Auffindung aller dieser so auffallenden optischen Täuschungen, von welchen die überraschendsten die des Anorthoskops sind, wo man durch radiale Schnitte einer drehenden Scheibe nach einer in entgegengesetztem Sinne schneller sich drehenden sieht, und wo die auf derselben befindlichen stark verzeichneten Figuren in richtiger Gestalt, aber vervielfältigt, still zu stehen scheinen.

Viele finden eine Schwierigkeit darin, etwas, was sie ununterbrochen wahrnehmen, als eine periodische Wiederkehr getrennter Eindrücke anzuerkennen. Die eben angeführten Versuche sind daher wichtig, weil sie auf eine unabweisbare Art die Thatsache feststellen, dafs das scheinbar continuirlichste Phänomen doch discontinuirlich sein kann.

Betrachtet man nämlich jene durch Rotation entstehenden Phänomene bei dem momentanen Leuchten eines electrischen Funkens oder durch die gleichweit abstehenden Oeffnungen eines eben so schnell, als jene Körper rotiren, gedrehten Rades, so sieht man dieselbe Erscheinung, als wenn jene rotirenden Körper ruhen.

Durch die Sirene, durch das Zählen der Schwebungen gleichzeitig erregter Töne, deren Höhe etwas verschieden, und andere Mittel hat man entschieden nachgewiesen, dafs die Höhe der Töne durch Schwingungen bedingt wird, deren Anzahl aber in einer Secunde nie 100000 erreicht. Das Vernehmen eines Tones ist also das Bewufstwerden periodisch wiederkehrender Eindrücke, die Unterscheidung seiner Höhe, ein mehr oder minder genaues Zählen derselben. Aus den vorher angeführten Erscheinungen haben wir gefunden, dafs das Auge kürzere Zeit, als den millionsten Theil einer Secunde beleuchtet, doch Gegenstände der verschiedensten Gestalt und Farbe deutlich sieht, dafs es einer mefsbaren Zeit bedarf, um sich bewufst zu werden, dafs es beleuchtet wurde, endlich, dafs es eine periodische Wiederkehr gleichartiger Eindrücke als eine ununterbrochene Erscheinung wahrnimmt. Wird nun, wie es die Undulationstheorie, gestützt auf die Interferenzerscheinungen, im Gegensatz des Newtonschen Emanationssystems annimmt, der Eindruck des Lichtes ebenfalls durch Schwingungen hervorgebracht, deren verschiedene Anzahl den Farbenunterschied bedingt, so mufs die absolute Anzahl derselben in einer Secunde sehr grofs sein, da ein den millionsten Theil einer Secunde dauerndes Leuchten hinreichte, die den Farbenunterschied bedingende Verschiedenheit ihrer Anzahl zu deutlichem Bewufstsein zu bringen.

Bei allen Berührungspunkten zwischen Optik und Akustik wird sich daher doch in den Erscheinungen selbst ein erheblicher quantitativer Unterschied zeigen, auch tritt derselbe in der Entwickelung beider Disciplinen deutlich hervor. In beiden Gebieten sind es schwingende Körper, welche zunächst ein sie umgebendes Medium in Bewegung versetzen, und vermittelst desselben zuletzt unsere Organe zu isochronen Schwingungen bestimmen. Es ist also eine dreifache Aufgabe gegeben, nämlich zu untersuchen, wie schwingt der leuchtende oder tönende Körper, wie pflanzen sich diese Schwingungen in den ihn umgebenden Medien fort, endlich, wie verhält sich das schwingende Organ, um in uns das Bewufstwerden eines sinnlichen Eindruckes hervorzurufen. Die Beantwortung der letztern Aufgabe fällt der Physiologie anheim, die der beiden andern der Physik. In ihre Beantwortung haben sich Akustik und Optik in der Weise getheilt, dafs die erstere fast allein sich mit den primären Schwingungen beschäftigt hat, die letztere mit den fortpflanzenden. Die Optik bleibt jetzt noch eine präcise Antwort auf die Frage schuldig, wie schwingt ein leuchtender Körper? während in der Akustik sich nicht scharf ermitteln läfst, wie die Lufttheilchen sich bewegen, wenn ein Ton aus der Ferne an unser Ohr schlägt. Daher müssen wir oft aus dem einen Gebiet Vorstellungen entlehnen, um uns in dem andern zurechtzufinden.

Auf diese Weise leuchtet unmittelbar ein, dafs die Fundamentalbestimmung der Wellenlänge in beiden Gebieten auf ganz verschiedene Weise erhalten worden ist. Unter Wellenlänge verstanden wir die Strecke, bis zu welcher in dem umgebenden Medium die secundäre Schwingung fortschreitet, während der primär schwingende (also tönende oder leuchtende Körper) eine ganze Schwingung, d. h. einen Hin- und

Zurückgang vollendet. Diese Länge ist also abhängig von der Schwingungsdauer der primären Schwingung des tönenden oder leuchtenden Körpers, und von der Geschwindigkeit der Fortpflanzung im umgebenden Medium. Die Wellenlänge eines Tones hängt also ab von der Höhe des Tones und der Schallgeschwindigkeit des fortpflanzenden Mediums, die Wellenlänge des Lichtes von der Farbe des Lichtes und der Brechkraft des von diesem Lichte durchstrahlten Mittels, vorausgesetzt nämlich, dafs die Brechung durch den Unterschied der Geschwindigkeit hervorgebracht wird, mit welcher das Licht die durchsichtigen Körper durchläuft, an deren gemeinsamer Grenze es seine Richtung verändert. In der Akustik hat man die Wellenlänge geschlossen aus der Bestimmung der Schwingungsanzahl eines Körpers, der einen Ton von bestimmter Höhe giebt und aus der directen Messung der Schallgeschwindigkeit, welche für Töne verschiedener Höhe in demselben Medium dieselbe ist; in der Optik hat man sie direct gemessen durch Verdoppelung des Längenüberschusses eines mit einem andern interferirenden Strahles von bestimmter homogener Farbe, wenn beide bei dem Zusammentreffen einander auslöschen. In der Akustik ist daher die Wellenlänge der fortpflanzenden Schwingungen, in der Optik die Schwingungszahl des leuchtenden Körpers eine erschlossene.

Für die Wellenlängen der mit den Buchstaben B, C, D, E, F, G, H bezeichneten Stellen des Spectrums hat Frauenhofer [1]) in Pariser Zollen folgende Gröfsen gegeben, welche für Luft gelten:

[1]) Kurzer Bericht von den Resultaten neuerer Versuche über die Gesetze des Lichtes und die Theorie desselben. Gilb. Ann. 74, p. 337.

B = 0.00002541
C = 0.00002422
D = 0.00002175
E = 0.00001945
F = 0.00001794
G = 0.00001587
H = 0.00001464.

Auf die Länge eines Pariser Zolles gehen daher Schwingungen:

bei B 39354
» C 41288
» D 45977
» E 51414
» F 55741
» G 63012
» H 68306.

Vergleicht man die Wellenlängen in verschiedenen Medien, so mufs in denen, in welchen das Licht sich mit geringerer Geschwindigkeit fortpflanzt, dieselbe kleiner werden. In Hundertmilliontheilen des Pariser Zolles ausgedrückt ist diese für Luft, Wasser, Terpentinöl und Anisöl folgende [1]):

| | Luft | Wasser | Terpentinöl | Anisöl |
|---|---|---|---|---|
| B . . . | 2541 | 1909 | 1730 | 1651 |
| C . . . | 2422 | 1821 | 1648 | 1573 |
| D . . . | 2175 | 1631 | 1475 | 1405 |
| E . . . | 1945 | 1368 | 1315 | 1249 |
| F . . . | 1794 | 1338 | 1208 | 1144 |
| G . . . | 1587 | 1181 | 1064 | 1003 |
| H . . . | 1464 | 1082 | 973 | 909 |

Aehnliche Messungen hat nenerdings in Beziehung auf Luft und Glas Nobert [2]) angestellt, er findet für die ver-

[1]) Neue Modificationen des Lichtes durch gegenseitige Einwirkung der Strahlen und Gesetze derselben. München 1818.

[2]) Ueber eine Glasplatte mit Theilungen zur Bestimmung der Wellenlänge und relativen Geschwindigkeit des Lichtes in der Luft und im Glase. Pogg. Ann. 85, p. 90.

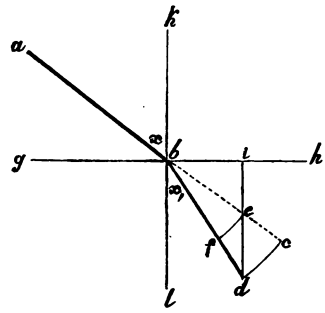
schiedenen Farben des Spectrums folgende Werthe in Pariser Linien:

| | Luft | | Glas |
|---|---|---|---|
| sehr tief roth | 0.000338 | roth . . . . . | 0.000199 |
| tief roth . . . | 0.000328 | roth . . . . . | 0.000188 |
| hellorange . . | 0.000281 | orange . . . . | 0.000177 |
| schwefelgelb . | 0.000258 | brandgelb . . | 0.000165 |
| grün . . . . . | 0.000234 | grüngelb . . . | 0.000153 |
| blaugrün . . | 0.000223 | grün . . . . . | 0.000141 |
| blau . . . . . | 0.000211 | indigo . . . . | 0.000130 |
| indigo . . . . | 0.000199 | rothviolett . . | 0.000118 |
| violett . . . . | 0.000187 | Mittel | 0.0001589. |
| tiefviolett . . | 0.000176 | | |
| Mittel | 0.0002435 | | |

Nun ist aber $\frac{0.0002435}{0.0001589} = 1.525.$

Dies war genau das Brechungsverhältnifs der angewendeten Glasplatte.

Aus allen diesen Versuchen geht also entschieden hervor, dafs die Wellenlängen in dem Medium, in welchem der gebrochene Strahl dem Einfallsloth näher ist, sich verkürzen, und zwar im Verhältnifs des Brechungsverhältnisses. Das Brechungsverhältnifs lehrt uns zunächst die Richtung finden, in welcher ein Strahl fortgeht, wenn er einen durchsichtigen Körper verläfst und in einen zweiten eindringt. In

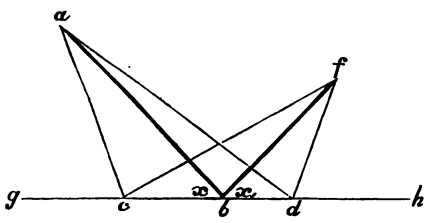



der folgenden Figur stelle $gh$ die Grenze vor zwischen Luft und Glas, $ab$ sei die Richtung des Strahles in der Luft, das Brechungsverhältnifs 3 : 2. Verlängern wir nun den Strahl $ab$ in das Glas hinein, z. B. bis $c$, und theilen $bc$, so dafs $be = \frac{2}{3}$ der Länge von $bc$ ist, so finden wir unmittelbar die Richtung

des Strahles im Glase, wenn wir durch *e* ein Loth *ei* auf die Grenze beider Medien *gh* fällen und den Punkt *d* bestimmen, in welchem ein mit *bc* beschriebener Kreis das verlängerte Loth *ei* schneidet. Dann ist *bd* die Richtung des Strahles im Glase. Durch die Messungen von Frauenhofer, Nobert und andern ergiebt sich, dafs in der Luft auf die Strecke *bc* so viel Wellen gehn, als im Glase auf die Strecke *bf*. Wäre also *bc* einen Pariser Zoll lang, das einfallende Licht von rother Farbe, so würden in der Luft 39354 Schwingungen auf dieser Länge erfolgen, ebensoviel im Glase auf die Länge *bf*, also 59031 im Glase auf einen Zoll, während die Dauer jeder einzelnen Schwingung in beiden Medien dieselbe bleibt, oder, was dasselbe ist, die Farbe sich nicht ändert.

Zwischen der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes, dem Gesetz der Reflexion, dafs es unter dem Winkel vom Spiegel zurückkehrt, unter dem es auffällt, und dem eben ausgesprochenen Brechungsgesetz scheint zunächst kein Zusammenhang stattzufinden, und doch sind alle drei Gesetze nur besondere Fälle eines allgemeineren, des Gesetzes nämlich, dafs das Licht, um von einem leuchtenden Punkte zum andern beleuchteten zu gelangen, auf directem Wege und auf Umwegen die kürzeste Zeit gebraucht. Befinden sich beide Punkte in demselben Mittel, so ist, da die Bewegung des Lichtes eine gleichförmige, die gerade Linie der kürzeste Weg zwischen beiden Punkten, in demselben Mittel bewegt sich also das Licht geradlinig. Soll es aber, ehe es den beleuchteten Punkt trifft, noch vorher an die Grenze des Mediums gelangen, d. h. mit einem Spiegel in Berührung kommen, so mufs es zwei gerade Linien beschreiben, deren Summe die kleinste ist. Ist nun (Fig. 2) *a* der leuchtende

Punkt, $gh$ der Spiegel, und soll das Licht, ehe es nach $f$ gelangt, in irgend einem Punkte den Spiegel berühren, so hat es zunächst die Wahl zwischen unendlich vielen Linienpaaren, $acf$, $abf$, $adf$ und so fort. Es wählt die kleinste Summe $ab+bf$, wo die Winkel, $x$ und $x_1$ einander gleich sind, die Summe, welche nur einmal vorkommt, während alle andern paarweise zu beiden Seiten desselben liegen. Befindet sich aber $a$ in einem andern durchsichtigen Mittel als $f$ (p. 77), d. h. soll das Licht die Grenze des Mediums überschreiten, um in ein anderes zu dringen, und bewegt sich das Licht im ersten Mittel schneller als im zweiten, so würde, wenn es direct von $a$ nach $f$ hin sich bewegte, es zu lange im zweiten Mittel sich aufhalten, und, wegen der geringeren Geschwindigkeit in demselben, Zeit verlieren. Es macht daher einen Umweg, es geht nach $b$ hin und dann erst von $b$ geradlinig nach $f$. Dieses plötzliche Umbiegen an der Grenze nennen wir Brechung, und das Gesetz derselben ist wiederum das, dafs das Licht den Punkt $b$ der Grenze beider Medien wählt, für welche die Zeit, deren es bedarf, um die beiden Wege $ab+bf$ zu durchlaufen, am kleinsten ist. Da aber durch den leuchtenden Punkt $a$ und den beleuchteten $f$ sich unendlich viele Ebenen legen lassen, unsere Zeichnung aber nur für eine Ebene gilt, so ist von selbst klar, dafs wir den Punkt $c$ in der Ebene wählen müssen, welche auf der spiegelnden oder brechenden Fläche $gh$ lothrecht steht. Wählten wir nämlich eine andre Ebene, so würden beide Linien, $ab$ und $bf$, sich bei der Projection auf die lothrechte Ebene verkürzen, die



zu dem Durchlaufen erforderliche Zeit also ebenfalls kleiner werden. Da sie aber die kleinste sein soll, so erfolgt die Spiegelung und Brechung stets in der lothrechten Ebene.

Die Annahme, dafs das Licht in dem dichtern Medium sich langsamer bewegt, als in dem weniger dichten, erscheint also vollkommen naturgemäfs, denn sie vereinigt unter einem allgemeineren Gesichtspunkt die scheinbar von einander unabhängigen Erscheinungen der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes, der Spiegelung und Brechung. Sie ist auch in der That jetzt nicht mehr eine Annahme, sondern eine direct erwiesene physikalische Thatsache, seitdem es gelungen ist, auf einer kurzen terrestrischen Standlinie zu zeigen, dafs eine Fläche später beleuchtet wird, als das Licht sich entzündet, welches sie erhellt.

Licht, welches von einem bestimmten Punkte aus gleiche Wege mit ungleicher Geschwindigkeit durchläuft, kann für jeden Punkt des Weges als zwei Lichtsignale betrachtet werden, welche nach einander erfolgen. Ein schnell sich um eine Achse drehender Spiegel hat in verschiedenen Zeitmomenten eine verschiedene Stellung, wird also von jenen Lichtsignalen in verschiedener Stellung getroffen. Von seiner Stellung hängt aber die Richtung ab, nach welcher er das Licht zurückstrahlt, das auf ihn fällt. Diese Richtung wird daher eine verschiedene sein für zwei Lichtsignale, die von demselben Punkt aus nach einander erregt werden. Denken wir uns nun zwei gleich lange, horizontale Röhren über einander, durch Spiegelscheiben an ihren Enden verschlossen, die obere mit Luft, die untere mit Wasser gefüllt, vor dem einen Ende derselben einen lothrechten Draht ausgespannt, der plötzlich glüht, auf der andern Seite einen um eine lothrechte Achse schnell rotirenden Spiegel. Bewegt sich das

Licht durch Luft schneller als durch Wasser, so wird ein an der Stelle des Spiegels befindliches Auge den Draht durch die mit Luft gefüllte Röhre früher glühen sehen, als durch die Wasserröhre. Blickt das Auge aber nach dem Spiegel, so wird dieser, wenn er von dem Licht durch die mit Luft gefüllte Röhre getroffen wird, sich noch nicht so weit gedreht haben, als wenn er von dem Licht beleuchtet wird, welches die Wasserröhre durchdringt. Das letztere Bild wird also nach einer andern Richtung gesehen werden, als das erstere, die leuchtende Linie wird also abgesetzt erscheinen, und zwar wird das Bild durch die Wasserröhre im Sinne der Drehung mehr abgelenkt erscheinen, als das durch die mit Luft gefüllte Röhre gesehene. Dies zeigt nun auch wirklich der Versuch.

Vermittelst eines schnell rotirenden Spiegels hatte Wheatstone bereits nachgewiesen, dafs der electrische Funke in der unterbrochenen Mitte eines langen Drahtes später erscheint, als der am Anfang und Ende desselben überschlagende, und es lag daher nahe, dies auf die Messung der Geschwindigkeit des Lichtes anzuwenden. Arago [1]) erörterte die Art, wie diese Versuche gemacht werden könnten, ohne sie selbst anzustellen. Dies geschah erst durch Foucault [2]). Bei seinen Versuchen fiel Licht durch eine quadratische Oeffnung auf ein Stabgitter aus 11 senkrechten Platindrähten und darauf auf eine achromatische Linse von grofser Brennweite. Ehe das Bild dieses Gitters durch die Linse zu Stande kommt, wird das Licht von dem rotirenden

[1]) Système d'expériences à l'aide duquel la théorie de l'émission et celle des ondes seront soumises à des preuves décisives. Ann. de Chim. et Phys. 71, p. 49.

[2]) Compt. rendu 30, p. 551 und Pogg. Ann. 81, p. 434.

Spiegel aufgefangen, so dafs das Bild also erst nach der Reflexion von diesem Spiegel entsteht, wegen der ununterbrochenen Aenderung der Stellung desselben aber mit grofser Geschwindigkeit sich fortbewegt. In einer bestimmten Entfernung von dem rotirenden Spiegel steht ein Hohlspiegel, dessen Mittelpunkt auf der Drehungsachse des ebenen Spiegels gelegen ist, und da vom Mittelpunkt einer Kugel ausgehende Strahlen auf die Oberfläche desselben senkrecht auffallend in sich reflectirt werden, so entsteht das Bild des Gitters, wenn die vom ebenen, rotirenden Spiegel ausgesendeten Strahlen den Hohlspiegel symmetrisch um die Achse desselben treffen, durch die in sich selbst zurückkehrenden Strahlen an der Stelle des das Bild erzeugenden Gitters selbst, welches nun durch ein schiefes Planglas seitlich gesgiegelt wird, um beobachtet werden zu können, ohne das auf das Gitter auffallende Licht zu verdecken.

Das von dem ebenen rotirenden Spiegel nach dem Hohlspiegel gesendete und in sich zurückkehrende Licht bedarf zum Durchlaufen dieses doppelten Weges einer sehr kleinen Zeit, welche verschieden ist, wenn in diesem Wege eine Luft- oder eine Wasserstrecke eingeschaltet ist. Das von dem Hohlspiegel zum ebenen Spiegel zurückgestrahlte Licht trifft also auf seinem Rückwege den ebenen Spiegel nicht mehr in der Stellung, in dem es ihn verlassen, und in einer desto mehr geänderten, je längere Zeit zwischen Hin- und Hergang verflofs. Bei dem Versuch von Foucault zeigte sich nun, dafs die Stäbe des Gitters bei Beschleunigung der Rotationsgeschwindigkeit, wenn sie durch beide untereinander befindliche Röhren gesehen wurde, an der Grenze beider Medien wie die Theilstriche eines Nonius durchschnitten, wobei die Streifen der Wasserhälfte im Sinne der allgemeinen

Ablenkung voraus lagen. Daraus geht hervor, dafs das Licht im Wasser sich langsamer bewegt, als in der Luft. Mifst man die Ablenkung des Bildes in Beziehung auf das bilderzeugende Gitter, so erhält man für jedes auffallende Medium die absolute Geschwindigkeit des Lichtes in diesem Medium, da, wenn die Umdrehung des Spiegels bekannt ist, durch die Ablenkung des Bildes sich ergiebt, wie grofs die Zeitdauer ist während des Hin- und Rückweges zwischen ebenem und Hohlspiegel, deren Entfernung bekannt ist. Bei diesen Versuchen geschah die Rotation des Spiegels durch eine Dampfturbine, und konnte zwischen 30 und 800 Umläufen in der Secunde verändert werden.

Aehnliche Versuche sind mit demselben Erfolg gleichzeitig von Fizeau und Breguet angestellt worden vermittelst eines Spiegels, welcher 500 Umläufe in der Secunde machte. Bei diesen Versuchen waren die Strahlen des auf den rotirenden Spiegel fallenden Lichtes parallel, sie wurden daher von einem festen ebenen Spiegel, nicht von einem sphärischen, senkrecht in sich zurückgesendet.

Die in der Luft und dem Wasser durchlaufenen Strecken waren äquivalent gewählt, d. h. die des Wassers im Verhältnifs 3:4 kleiner als die in der Luft. Da nun das Brechungsverhältnifs aus Luft in Wasser 4:3, so mufste die durch diese Strecken erfolgte Ablenkung dieselbe sein, während sie nach dem Emanationssystem im Verhältnifs von 9:16 hätte verschieden ausfallen müssen. Das Ergebnifs des Versuches entschied durch die beobachtete Gleichheit der Ablenkung für das Undulationssystem.

Da es wünschenswerth ist, überall wo es thunlich ist, directe Methoden an die Stelle indirecter zu setzen, so möge hier noch das von Fizeau angewendete Verfahren erwähnt

werden, auch ohne rotirenden Spiegel die Geschwindigkeit des Lichtes auf der Erde zu messen. Bei dem Verfahren von Bradley durch die Aberration des Fixsternlichtes ist die Standlinie eine von ungemessener Gröfse, nämlich von der Erde zu den Fixsternen, bei dem von Römer der Durchmesser der Erdbahn von 40 Millionen Meilen, bei Fizeau betrug sie nur etwas mehr als eine deutsche Meile, nämlich 8633 Meter. In dieser Entfernung von einander, nämlich in einem Hause von Suresnes und auf der Montmartre waren zwei gleiche Fernröhre von 6 Centimeter Oeffnung so aufgestellt, dafs ihre Achsen in eine gerade Linie fielen, während ihre Objective einander zugekehrt waren. Da nun Strahlen, welche parallel auf das Objectiv eines Fernrohrs fallen, im Brennpunkt dieses Objectivs sich vereinigen, so werden umgekehrt Strahlen, welche vom Brennpunkt des Objectivs ausgehen, aus demselben parallel austreten.

Entzündet sich nun in dem Brennpunkt A des einen Fernrohrs ein Licht, so werden die Strahlen desselben aus dem Objectiv B desselben parallel austreten, auf das Objectiv *b* des zweiten Fernrohrs fallen und sich in dem Brennpunkt *a* dieses zweiten Fernrohrs vereinigen. Befindet sich in dem Brennpunkt *a* dieses zweiten Fernrohrs ein ebener Metallspiegel, senkrecht auf die Achse des Fernrohrs, seine spiegelnde Seite dem Objectiv zugekehrt, so werden die von diesem Spiegel reflectirten Strahlen genau so auf das Objectiv *b* fallen, als wenn sie von einem Licht im Brennpunkt desselben ausgingen, also parallel austreten, ebenso auf das Objectiv B des ersten Fernrohrs fallen, und sich in dem Brennpunkt desselben A, von dem sie ursprünglich ausgegangen sind, wieder vereinigen. Ist nun das in diesem Brennpunkt erzeugte Licht ein in gleichen Intervallen intermit-

tirendes, so werden, weil eine Zeit vergeht während Hin- und Herganges des Lichtes zwischen beiden Fernröhren, die Intervalle des reflectirt zurückkehrenden Lichtes nicht mit denen des direct ausgehenden zusammenfallen. Mifst man die Verspätung desselben, so erhält man unmittelbar die Zeit, welche das Licht braucht, den Abstand beider Fernröhre zweimal zu durchlaufen.

In dem Versuch von Fizeau wurde das Intermittiren des Lichtes dadurch hervorgebracht, dafs in dem Brennpunkt A des ersten Fernrohrs sich der Umfang eines mit 700 gleichweit abstehenden Zähnen besetzten Rades befand, welches vermittelst eines Räderwerks schnell gedreht werden konnte. In der Seitenwand des Fernrohrs befand sich eine Linse, in der Achse desselben, zwischen dem Rade und dem Ocular des Fernrohrs ein unter 45 Grad geneigtes durchsichtiges Spiegelglas. Eine vor der Seitenlinse stehende Lampe sendete ihre Strahlen so auf diesen geneigten Spiegel, dafs ihre Strahlen sich im Brennpunkt vereinigten, wenn sie durch eine Lücke der Zähne hindurch gehen konnten. In diesem Falle sah man bei stillstehendem Rade das Bild des Lichtes im andern Fernrohr wie einen Stern. Bei einer bestimmten Drehungsgeschwindigkeit verschwand hingegen das Licht, bei doppelter erglänzte der Punkt von Neuem, um bei dreifacher wieder zu verschwinden und so fort. Im ersten Falle, nämlich dem des Verdunkelns, war die zum Durchlaufen eines Abstandes von 17266 Metern nöthige Zeitdauer die Zeit, welche vergeht, wenn das aus der Lücke austretende Licht bei seiner Rückkehr durch den nächsten Zahn verdeckt wird. Dies geschah bei 12,6 Umläufen in der Secunde. Da nun bei einer Umdrehung die Zeit, welche nöthig ist, damit ein Zahn an die Stelle der Lücke tritt, $\frac{1}{1400}$ Secunde ist, so

durchläuft das Licht den Raum von 17266 Meter in $\frac{1}{17640}$ Secunde, also 304572240 Meter in einer Secunde, die deutsche Meile zu 7408 Meter gerechnet, also 41114 Meilen.

Mit dem Fizeau'schen Apparate könnte eine andre wichtige Frage direct beantwortet werden, ob nämlich die Geschwindigkeit des Lichtes in der Luft unabhängig ist von seiner Schwingungsdauer, d. h. ob verschiedenfarbiges Licht bei gleicher Umdrehung des Rades verschwindet. Von dem Schalle wissen wir, dafs hohe und tiefe Töne sich in der Luft gleich schnell fortpflanzen. Wäre dies nicht der Fall, so müfste bei jedem Musikstück angegeben werden, aus welcher Entfernung man es hören müsse. Gilt dies auch für Licht? So lange directe Versuche fehlen, müssen wir uns mit indirecten Prüfungen begnügen.

Wird die Vorstellung, dafs wir Weifs sehen, in uns dadurch hervorgerufen, dafs unsere Netzhaut gleichzeitig erregt wird von allen den Schwingungen, deren Periode zwischen den beiden äufsersten Grenzen des Spectrums liegt, so werden, wenn ein weifses Licht in grofser Entfernung von uns verlöscht, und Licht verschiedener Schwingungsperiode sich ungleich schnell fortpflanzt, im Uebergang des Leuchtens des Weifsen zur Dunkelheit Farben hervor treten müssen. Bewegten sich z. B. die Strahlen, deren Schwingungsdauer allein den Eindruck des Rothen machen, am langsamsten, so würden diese noch zum Auge gelangen, während die andern bereits aufgehört haben, auf die Netzhaut zu wirken. Wir würden daher das Weifs so erlöschen sehen, als wenn das Spectrum mit einem von dem violetten nach dem rothen Ende hin fortrückenden Schirm bedeckt würde, und aus den unverdeckten Farben eine Mischung gebildet würde. Dies zeigt sich aber nicht bei der Verfinsterung der

Jupitersmonde, sie verdunkeln sich plötzlich, ohne vor ihrem Verschwinden farbig zu werden. Aus dieser Erscheinung schlofs Muschenbroek [1]), dafs in dem Raume, welcher die Erde vom Jupiter im weitesten Abstande trennt, eine verschiedene Geschwindigkeit farbigen Lichtes nicht hervortritt.

Gegen diesen Beweis könnte eingewendet werden, dafs er nicht direct von dem farbigen Licht, sondern von dem weifsen entlehnt sei. Aber auch der directe Beweis ist gegeben. Da man nämlich unter den Fixsternen aufser den weifsen auch rothe, gelbe, blaue und grüne unterscheidet, alle aber dieselbe Aberrationsconstante geben, so folgt daraus dieselbe Geschwindigkeit für alle Farben.

Auch der stärkste Lichtglanz vermag keinen unmittelbar wahrnehmbaren mechanischen Effect hervorzubringen. Wenn nun kleine Erschütterungen, um sinnlich wahrgenommen zu werden, einer vielfachen Wiederholung bedürfen, wie unendlich grofs mufs die Anzahl der Schwingungen sein, welche unsere Netzhaut erregen, um in uns die Vorstellung: »ich sehe« hervorzurufen.

[1]) Introductio ad philosophiam naturalem §. 1813: quando satelles immergetur in umbram, radii rubri, utpote secundum aliquot philosophos velocissimi, prius perveniunt ad terram, quibus reliqua lux orbabitur, deinde quoque aurantiis, postea flavis, tum planeta spectaretur lurido vel caeruleo colore, et ita evanesceret ex conspectu: emergens satelles ex umbra, primo spectaretur colore rubro, tum rubro et aurantio, tum rubro aurantio et flavo, tum rubro, aurantio, flavo, viridi; tum rubro aurantio flavo, viridi, caeruleo, quibus accederet deinde color purpureus, violaceus ut ultimo spectaretur candidus, sic secundum aliorum eruditorum sententiam radii violacei sint velocissimi, contrarius colorum ordo erit: sed ejusmodi varietas non comparet; candidus apparet satelles, qui subit eclipsin, candidus est cum emergit ex umbra. (Short's Beob. Phil. Trans. 48, p. 268. 779).

Aus den Wheatston'schen früher angeführten Versuchen über die Lichtdauer electrischer Entladungen hatten wir geschlossen, dafs die Zahl der Schwingungen nothwendig die Zahl mehrerer Millionen in einer Secunde übertreffen mufs. Werden wir uns nun wundern, dafs sie noch gröfser ist, da sie nicht kleiner sein kann, als eine Zahl, die unsre gewöhnlichen Vorstellungen schon weit übertrifft.

Zur Bestimmung der wirklichen Anzahl dieser Schwingungen haben wir nun folgende Data:

Nach den Versuchen von Biot bewegt sich das Licht in der Zeit, in welcher es in der Luft eine Million Meilen durchläuft, im leeren Raum 294 Meilen weiter.

Die Wellenlängen des Lichtes sind also im leeren Raum im Verhältnifs von 1000294 : 1000000 gröfser, als im luftvollen. Für die mit den Buchstaben B, C, D, E, F, G, H, bezeichneten Stellen des Spectrums würden sie also nach den von Frauenhofer in der Luft angestellten Messungen folgende Gröfsen für den leeren Raum ergeben:

Anzahl der Wellenlängen

| | auf einen Zoll | auf eine geographische Meile |
|---|---|---|
| B . . . . . | 39342 | 10784.000000 |
| C . . . . . | 41276 | 11315.000000 |
| D . . . . . | 45963 | 12599.000000 |
| E . . . . . | 51399 | 14089.000000 |
| F . . . . . | 55725 | 15275.000000 |
| G . . . . . | 62994 | 17268.000000 |
| H . . . . . | 68286 | 18719.000000 |

Die geographische Meile als funfzehnter Theil des Erdäquators zu 22843,4 Pariser Fufs gerechnet. Nach den neuesten Bestimmungen von Encke [1]) ist die mittlere Entfernung der Sonne von der Erde 20.686329 geographische

[1]) Astronom. Jahrb. für 1852 p. 323.

Meilen. Wird dieser Raum in 493.2 Secunden vom Licht durchlaufen, so ist der in einer Secunde zurückgelegte Weg 41935 geographische Meilen. Die Anzahl der Schwingungen, in welche die Netzhaut innerhalb einer Secunde versetzt wird, um die Farbe zum Bewufstsein zu bringen, welche im Spectrum durch die Buchstaben B, C, D, E, F, G, H bezeichnet wird, ist demnach folgende:

| | |
|---|---|
| bei B, nahe dem rothen Ende | 452.000000.000000 |
| » C, im Roth . . . . . | 474.000000.000000 |
| » D, im Orange . . . . . | 528.000000.000000 |
| » E, im Grün . . . . . | 591.000000.000000 |
| » F, im Blau . . . . . | 641.000000.000000 |
| » G, im Indigo . . . . . | 724.000000.000000 |
| » H, im Violett . . . . . | 785.000000.000000 |

Nach den mit Hülfe Marloyes von Despretz[1]) wiederholten Savart'schen Versuchen über die Grenze der Wahrnehmbarkeit der Töne entsteht der tiefste Ton, dessen Höhe sich noch bestimmen läfst, durch sechzehn Einbiegungen und Ausbiegungen des Trommelfells, oder durch 32 einfache Schwingungen, der höchste überhaupt wahrnehmbare durch 73000 solcher Schwingungen, also durch 36500 Einbiegungen und eben so vielen Ausbiegungen des Trommelfells. Bis zu 65536 einfachen Schwingungen oder 32768 Tonwellen in der Secunde ist es noch möglich, die Ton-Intervalle zu bestimmen.

Die Geschwindigkeit des Schalls in der Luft steigt mit der Wärme derselben, bei der mittleren Wärme von Berlin beträgt sie nahe 1024 Fufs in der Secunde, die Wellenlänge dieses tiefsten Tones ist daher dann 32 Fufs, die des höchsten noch musikalisch bestimmbaren 2 1/4 Linien, des höchsten überhaupt wahrnehmbaren etwa 2 Linien.

[1]) Compte rendu 20, p. 1214. Pogg. Ann. 65. p. 440.

Aus diesen Bestimmungen folgt, dafs die Wellenlänge der tiefsten Farbe über 500 Mal kleiner ist, als die Wellenlänge des höchsten Tones, denn bei dem, jenseits B eben aufdämmernden Roth gehen 39000 auf die Länge eines Zolls, bei dem höchsten Ton nur 72. Nun bewegt sich aber der Schall in der Luft so langsam, dafs er $10^{2}/_{3}$ Tage bedarf, um die Strecke zu durchlaufen, welche das Licht in einer Secunde durcheilt. Während ein von der Sonne ausgesendeter Lichtstrahl von einem terrestrischen Spiegel zurückgesendet in 16 Minuten nach derselben zurückkehrt, würde ein Sonnenbewohner, wenn der Zwischenraum zwischen Erde und Sonne mit Luft erfüllt wäre, die augenblicklich gegebene Antwort auf eine an einen Erdbewohner gerichtete Frage erst nach 29 Jahren erhalten.

Da nun das Licht ungeheure Abstände mit sehr kleinen Schritten durcheilt, der Schall mit grofsen Schritten nur langsam vorschreitet, so ist die Anzahl der Schritte beider in derselben Zeit (die Schwingungen) so unendlich verschieden.

Ist diese weite Kluft ganz unausgefüllt? gewifs nicht, denn jenseits des rothen Endes des Spectrums erregt das Sonnenlicht noch eine merklich erhöhte Temperatur durch Schwingungen, für welche unsere Netzhaut nicht anspricht, welche aber für unser allgemeines Gefühl vorhanden sind. Wäre es möglich, den Zwischenraum zwischen jenen beiden Gebieten durch experimentale Uebergänge in der Erregung zu vermitteln, so würde sich dies ohngefähr auf folgende Weise in der Erscheinung darstellen [1]).

»In der Mitte eines grofsen finstern Zimmers mag sich ein Stab befinden, der in Schwingung versetzt ist, und es

[1]) Ueber die Wirkungen aus der Ferne p. 17.

soll zugleich eine Vorrichtung vorhanden sein, die Geschwindigkeit dieser Schwingung fortwährend zu vermehren. Ich trete in dieses Zimmer in dem Augenblick, wo der Stab viermal schwingt. Weder Auge noch Ohr sagt mir etwas von dem Vorhandensein dieses Stabes, nur die Hand, welche seine Schläge fühlt, indem sie ihn berührt. Aber die Schwingungen werden schneller, sie erreichen die Zahl 32 in der Secunde und ein tiefer Baſston schlägt an mein Ohr. Der Ton erhöht sich fortwährend, er durchläuft alle Mittelstufen bis zum höchsten schrillenden Ton, aber nun sinkt alles in die vorige Grabesstille zurück. Noch voll Erstaunen über das, was ich hörte, fühle ich plötzlich von der Stelle her eine angenehme Wärme sich strahlend verbreiten, so behaglich, wie sie ein Kaminfeuer aussendet. Aber noch bleibt alles dunkel. Doch die Schwingungen werden noch schneller, ein schwaches rothes Licht dämmert auf, es wird immer lebhafter, der Stab glüht roth, dann wird er gelb und durchläuft alle Farben, bis nach dem Violett alles wieder in Nacht versinkt. So spricht die Natur zu verschiedenen Sinnen zuerst ein leises, nur aus unmittelbarer Nähe vernehmliches Wort, dann ruft sie mir lauter aus immer weiterer Ferne zu, endlich erreicht mich auf den Schwingen des Lichts ihre Stimme aus unmeſsbaren Weiten.«

Ist aber der Unterschied nur ein quantitativer, oder ist die Art der Schwingungen in dem vermittelnden Medium vielleicht eine andre. Dies führt uns zu der Frage, welcher Art sind die fortschreitenden Schwingungen des Aethers, transversal wie Wasserwellen oder, longitudinal, wie Tonwellen? [1]) Wenn man den ersten Schlag einem gespannten

[1]) Diese als fortschreitend betrachtet. Die stehenden Schwingungen der tönenden Körper können bekanntlich longitudinal,

Tau von Oben nach Unten giebt, den zweiten in einer horizontalen Richtung, so wird die erste reflectirte Welle nicht mit der zweiten, noch gerade fortschreitenden interferiren (da die Impulse zwar noch gleich sind, aber nicht mehr nach einander entgegengesetzten Richtungen wirken), sondern dem Gesetze des Parallelogramms der Kräfte folgend eine diagonale Mittelkraft erzeugen. Zwei in derselben Ebene polarisirte Lichtmassen interferiren unter denselben Bedingungen, unter welchen directes Licht interferirt; hingegen interferirt auf einander senkrecht polarisirtes Licht unter diesen Bedingungen nicht. Sollte sich diese auffallende Erscheinung nicht dadurch erklären, dafs bei gleichartig polarisirtem Lichte die Querschwingungen in einer Ebene liegen, bei dem in verschiedenen Ebenen polarisirten aber in verschiedenen Ebenen? Sollten nicht also überhaupt die Schwingungen des Aethers transversal sein?

Die Richtung eines auf den Boden gestützten, ebenen Brettes ist dadurch nicht vollkommen bestimmt, dafs man seine Neigung gegen den Boden angiebt; die Durchschnittslinie beider kann nämlich noch nach jedem beliebigen Punkte des Horizontes gerichtet sein. Das Brett läfst sich daher

transversal, drehend und normal sein. Bei longitudinalen Schwingungen verlängert und verkürzt sich ein cylindrischer Stab, mit Beibehaltung seiner geradlinigen Gestalt, bei transversalen biegt er sich bei gleich bleibendem Abstande seiner Endpunkte, bei drehenden ändert er weder den Abstand derselben noch seine geradlinige Gestalt, aber jede geradlinige Seitenlinie seiner cylindrischen Oberfläche wird abwechselnd eine rechts und eine links gewundene Spirale, bei normalen Schwingungen endlich, fällt auch die letzte Veränderung fort, aber er ändert die Gröfse seines Querschnitts, verhält sich also so, wie wenn er schnell hinter einander sich erwärmte und abkühlte. Die den Ton fortpflanzenden Schwingungen sind hingegen stets longitudinal.

bei gleich bleibender Neigung so drehen, dafs die Durchschnittslinie einen Kreis beschreibt. Bei dieser Drehung wird es immer zwei, um eine halbe Drehung von einander abstehende Lagen geben, in welchen die Durchschnittslinie dieselbe Richtung hat, jede ihr im Raume parallele gerade Linie also jener geneigten Ebene parallel ist. Läfst man einen lothrecht gehaltenen Stab auf diese Ebene hinabfallen, so wird derselbe bei der Drehung der Ebene diese immer unter demselben Winkel treffen, er wird also bei dem Aufstofsen auf diese Ebene sich immer auf dieselbe Weise in einer auf ihr senkrechten Ebene abgleitend umbiegen. Ganz etwas andres wird eintreten, wenn ein horizontal gehaltener Stab hinabfällt. In den beiden Lagen der sich drehenden Ebene, wo er ihr parallel ist, wird er mit allen Punkten gleichzeitig auf die Ebene treffen, bei weiterer Drehung der Ebene wird seine Neigung bis zu der darauf senkrechten Richtung immer zunehmen, er sich selbst daher bei dem Auffallen immer stärker umbiegen. »Und nun, möchte ich in der Weise des Cartesius zu dem Leser sagen, wünsche ich, dafs du glaubest, der horizontale Stab, den ich habe fallen lassen, sei nichts andres, als die Schwingungsrichtung in einem Strahle polarisirten Lichtes, jenes schiefe Brett ein gegen ihn geneigter Spiegel, und du wirst den Grund einsehen, warum dieses Licht in zwei Stellungen des geneigten Spiegels nicht reflectirt wird (der Stab sich nicht umbiegt), warum bei weiterer Drehung es in desto gröfserer Helligkeit reflectirt wird, bis in der auf jener ersten senkrechten Stellung der Reflexionsebene diese Helligkeit am gröfsten. Du wirst auch einsehen, warum, wenn einer den fallenden Stab während des Falles plötzlich dreht, nun bei einem andern Stadium der Drehung des Brettes dieselben Erscheinungen eintreten

werden, warum also, wenn du ein die Schwingungsebene des Lichtes änderndes Glimmerblättchen zwischen der polarisirenden Vorrichtung und dem analysirenden Spiegel einschaltest, das vorher in einer bestimmten Stellung des Spiegels unsichtbare Licht plötzlich in allem Glanze wieder erscheint. Wenn aber dir einer einreden wollte, der Stab falle lothrecht herunter, Huyghens habe es gesagt, auch Euler, so weifs ich im Voraus, was du erwiedern wirst. Wie können sie urtheilen? wirst du sagen, sie haben ja das schiefe Brett nicht gesehn. Wer kann noch glauben, wenn er Malus Polarisationsapparat kennt, dafs das Licht longitudinal schwinge? nein, es schwingt transversal.«

In dieser Beziehung ist auch Huyghens in der That keine Autorität. Vermittelst seiner Theorie longitudinaler Schwingungen hatte er zwar mehr enträthselt, als irgend einer seiner Vorgänger, ja er fand da das Rechte, wo Newton sich irrte, aber er gesteht selbst, dafs sie solche Erscheinungen nicht zu erklären vermöge. Er kannte die Polarisation, ja er ist der Entdecker derselben. Jeder Gegenstand erscheint durch ein Kalkspathrhomboëder verdoppelt, durch zwei über einander gelegte also im Allgemeinen vierfach. Legt man diese aber so über einander, dafs sie in einer auf ihrer natürlichen Lage rechtwinkligen sich kreuzen, so verschwinden zwei jener vier Bilder. Das durch einen Kalkspath gegangene Licht hat also eine Eigenschaft erhalten, die es wesentlich von dem natürlichen unterscheidet. Hier zeigt sich nun Huyghens als ächter Naturforscher, wahr und offen der Natur gegenüber. Nachdem er die Gesetze der Doppelbrechung im Kalkspath aus den Principien der Wellentheorie vollständig entwickelt und empirisch bewährt, so dafs alle spätern Verfeinerungsmittel der Messung sie nur bestätigen konnten,

fügt er hinzu [1]): »Ehe ich diese Schrift beende, will ich noch eine merkwürdige Erscheinung erwähnen, die ich entdeckt habe, nachdem ich alles Obige geschrieben. Denn ob ich gleich bisher ihren Grund nicht gefunden, so will ich doch sie anzuführen nicht unterlassen, um Andern Gelegenheit zu geben, ihn zu suchen. Es scheint, man mufs noch andre Suppositionen aufser denen machen, die ich gemacht, welche aber dennoch ihre Wahrscheinlichkeit nicht verlieren, indem sie an so vielen Prüfungen sich bestätigt. Wie die Erscheinung entsteht, das zu sagen, habe ich nichts bisher gefunden, was mir genügte. Ich überlasse daher Andern diese Untersuchung.« 120 Jahre später betrachtete ein französischer Offizier die Fenster eines entfernten Hauses durch einen Kalkspath. Eins derselben war von der Abendsonne scharf beschienen. Bei der Drehung des Kalkspathes verschwindet das Licht, als aber die Sonne weiter gerückt es nicht mehr erhellt, verdoppelt sich das Fenster, wie jeder andre Gegenstand. Das Licht hatte also durch Reflexion dieselbe Eigenschaft erhalten, wie in Huyghens Versuche das durch einen Kalkspath gegangene. So entdeckte Malus die durch Reflexion entstehende Polarisation des Lichtes.

Spaltet man von einem Turmalinkrystalle zwei der Achse [2]) parallele Platten, so sind sie, auf dieselbe Weise wieder zusammengelegt, durchsichtig. Dreht man eine Platte auf der andern, bis ihre Achsen sich rechtwinkelig kreuzen, so werden sie absolut undurchsichtig [3]), schiebt man aber

[1]) Traité de la lumière p. 88.

[2]) Die Turmaline krystallisiren in länglichen Säulen. Die der Länge dieser Säule parallele Richtung heifst die Achse des Krystalls.

[3]) Diese Eigenschaft des Turmalin ist von Seebeck und Biot entdeckt. Ann. de Chim. 1815. May und Biot Traité de physique.

ein Glimmerblatt zwischen beide, wieder durchsichtig. Denkt man sich Nadeln in ein Sieb geschüttet, in dessen Boden lauter parallele Schlitze sich befinden, durch welche die Nadeln hindurchfallen können, so werden alle hindurch fallende parallel sein. Fängt man sie in einem zweiten, ganz ähnlichen Siebe auf, so werden bei gleicher Lage desselben die Nadeln auch durch dieses hindurch fallen. Dreht man hingegen das untere Sieb in seiner Ebene um einen Viertelkreis, so werden alle Nadeln liegen bleiben, sie würden jedoch bei dieser Stellung des zweiten Siebes ebenfalls durchfallen, wenn sie während ihrer Bewegung zwischen dem ersten und zweiten Siebe auf irgend eine andre Weise um eben so viel gedreht würden. Fielen die Nadeln in lothrechter Lage herab, so würde eine Drehung der Siebe in ihrer Ebene keinen Unterschied hervorbringen. Ich brauche wohl nicht erst zu sagen, dafs die Siebe die Turmalinplatten bedeuten, die Nadeln aber die Schwingungen vorstellen, welche nach der einen Richtung des Körpers sich ungehindert fortpflanzen, in der darauf senkrechten aber aufgehoben werden. Ich will nur noch hinzufügen, dafs ein gewöhnlicher doppelt brechender Körper einem Siebe zu vergleichen ist, welches zwei auf einander senkrechte Systeme länglicher Oeffnungen enthält, dafs er also zwei auf einander senkrecht polarisirte Bilder gleicher Helligkeit giebt, welche sich so verhalten, als wäre Licht durch zwei neben einander liegende Turmalinplatten gegangen, deren Achsen aber einen rechten Winkel mit einander bilden. Eine sehr dünne Turmalinplatte zeigt auch wirklich beide Bilder, bei zunehmender Dicke wird aber eins derselben immer schwächer, bis es endlich vollkommen verschwindet. Dies sieht man sehr deutlich, wenn man ein Prisma von wenigen Graden aus einem Turmaline so schleift,

dafs die Kante des Prismas parallel ist der Achse des Krystalls. Das Verlöschen des einen Bildes geschieht am schnellsten in den ledergelben, welche aber sehr selten sind. Darauf folgen in Beziehung auf ihre polarisirende Wirkung die grünen brasilianischen. Am wenigsten leisten die bläulichen Turmaline. Schafft man auf irgend eine andere Weise in einem doppelt brechenden Körper eins der Bilder fort, so erhält man eine künstliche, dem Turmalin vollkommen analog wirkende Vorrichtung. Bei den aus Kalkspath zusammengesetzten Nicol'schen Prismen wird das eine Bild durch Spiegelung fortgeschafft, und man erhält so eine polarisirende Vorrichtung, die vor den Turmalinen den grofsen Vorzug hat, dafs sie vollkommen farblos ist, alle Farbenerscheinungen der Polarisation daher in gröfster Reinheit darstellt. Da nämlich der Canadabalsam ein Brechungsverhältnifs besitzt, welches zwischen das des ordentlichen und des aufserordentlichen Strahles des Kalkspaths fällt, so wird, wenn man ein Kalkspathstück in zwei Hälften schneidet und die trennenden spiegelnden Flächen mit Canadabalsam wieder zusammenkittet, der ordentliche Strahl wegen der geringeren Brechkraft des Canadabalsams bei einer bestimmten Neigung der Fläche gegen die Richtung des Strahles total reflectirt, während der aufserordentliche Strahl durch die Schicht hindurch in die zweite Hälfte eintritt [1]). Jeder polarisirende Apparat besteht, wie es aus der vorigen Betrachtung erhellt, aus zwei in ihrer Wirkung auf directes Licht vollkommen

[1]) Nicol on a method of so far increasing the divergency of the two rays in calcareous spar, that only one image may be seen at a time. Jameson Edinb. Journ. 20, p. 83, und Radicke de phaenomenis quibusdam, quae prismata Nicoliana offerunt, de subsidiisque quibus quam optima construantur.

gleichen Vorrichtungen, von denen die eine (das obere Sieb) das direct einfallende Licht polarisirt (die vorher ungeordneten Nadeln in parallele Richtungen ordnet), die andre aber das so polarisirte Licht analysirt, d. h. die Unterschiede nachweist, welche dieses Licht von eben so einfallendem, directem Lichte unterscheiden. Polarisirt wird aber directes Licht dadurch, dafs es von einer nicht metallischen Substanz unter dem Winkel reflectirt wird, bei welchem der in die Substanz eindringende Theil desselben senkrecht steht auf dem zurückgespiegelten, oder dafs es durch eine grofse Anzahl Platten eines durchsichtigen, einfach brechenden Körpers hindurchgeht (am besten eignet sich hierzu ein Satz dünner, klarer Glasscheiben), endlich dadurch, dafs es durch einen doppelt brechenden Körper hindurchgeht, bei welchem nur eins der auf einander senkrecht polarisirten Bilder sichtbar ist, weil sonst die von beiden entstehenden Erscheinungen sich durch Uebereinandergreifen verwirren. Aus den Combinationen dieser Vorrichtungen folgen neun verschiedene, in ihrer Wirkung aber vollkommen übereinstimmende Apparate, indem man das auf eine dieser Arten polarisirte Licht stets auf dreierlei Weisen analysiren kann [1]). Die analysirende Vorrichtung mufs natürlich drehbar um den polarisirten Strahl als Achse sein [2]). Um aber zu entschei-

[1]) In ihrer Zusammensetzung kommen diese Apparate aber auf sechs zurück, nämlich: 2 Spiegel, 2 Turmalinplatten, 2 Glassätze, 1 Spiegel und 1 Turmalinplatte, 1 Spiegel und 1 Glassatz, 1 Turmalinplatte und 1 Glassatz.

[2]) Bei dem Apparat von Guérard wirkt die spiegelnde Fläche eines ruhenden Kegels wie der analysirende drehbare ebene Spiegel bei den gewöhnlichen Apparaten von Biot und Seebeck. Dieser Apparat ist besonders geeignet, um einer gröfsern Anzahl wenigstens einige der Polarisationserscheinungen anschaulich zu machen. Der

den, ob Licht, von welchem man nicht weifs, ob es direct, oder auf einem Umwege in das Auge gelangt, polarisirt sei, bedarf man nur einer analysirenden Vorrichtung, welche man vor dem Auge herumdreht; am besten leistet diesen Dienst eine Turmalinplatte, oder ein Nicol'sches Prisma. Aendert sich die Intensität des Lichtes bei dem Drehen gar nicht, so ist es unpolarisirt; verschwindet es einmal vollkommen, so ist es vollständig polarisirt, hingegen theilweise polarisirt, wenn es bei dem Drehen Abwechselungen der Helligkeit zeigt.

Man hat Polarisationsebene eines Strahles [1]) die durch denselben und durch die Achse einer Turmalinplatte

gerade Kegel aus schwarzem Glase steht lothrecht auf der Ebene eines mit weifsem Papier überzogenen Brettes. Durch eine Oeffnung im Laden des verfinsterten Zimmers fällt Sonnenlicht durch einen Heliostaten in horizontaler Richtung parallel der Achse des Kegels auf die Oberfläche desselben, und wird nun vollständig polarisirt von der Fläche desselben auf das weifse Papier reflectirt, welches gleichförmig erleuchtet erscheint. Schaltet man nun in den Weg des auf den Kegel fallenden Lichtes einen Satz klarer Glasscheiben ein, so wirkt der Kegel für das durch denselben polarisirte Licht als analysirende Vorrichtung. Das Papier erscheint nun durch einen schwarzen Durchmesser in 2 Hälften getheilt, von welchen aus die Helligkeit bis zu einem darauf senkrechten Durchmesser, wo sie am gröfsten ist, ununterbrochen zunimmt. Geht das Licht, ehe es auf den Kegel fällt, noch durch eine senkrecht auf die Achse geschliffene Bergkrystallplatte, so erscheint auf dem Kreise unmittelbar die Farbenfolge, welche man bei dem gewöhnlichen Apparate nach einander durch Drehung erhält.

[1]) Unter Strahl verstehe ich, ohne Rücksicht auf irgend eine Theorie, die durch zwei als undurchsichtig gedachte Punkte gegebene Richtung, von welchen Punkten der eine den andern beschattet, wenn sie beide gleichzeitig durch dasselbe Licht beleuchtet sind, dieses Licht mag an sie direct, gespiegelt oder gebrochen gelangen. Wer an solchen Abstractionen Anstofs findet, mufs sich auch darüber

gelegte Ebene genannt in der Lage dieser Platte, bei welcher dieser Strahl verschwindet. In diesem Sinne nennt man die Reflexionsebene des durch Spiegelung polarisirten Lichtes die Polarisationsebene desselben, weil, soll es dem Auge verschwinden, die Achse des ihm vorgehaltenen Turmalins in dieser Ebene liegen mufs. In demselben Sinne ist das durch einfache Brechung polarisirte Licht senkrecht auf jene Ebene polarisirt.

Dafs die Erklärung des Regenbogens durch reflectirtes Licht richtig sei, geht daraus hervor, dafs sein Licht in einer durch die Sonne gehenden Ebene polarisirt ist; denn durch eine Turmalinplatte betrachtet, verschwindet er vollkommen, wenn die Achse derselben nach der Sonne weist, während die Wolken, über welche er gespannt ist, bei der Drehung ihre Helligkeit unverändert behalten. Das nach allen Seiten gleichmäfsig verstreute Licht der Wolken ist nämlich unpolarisirt, während wiederum das von dem blauen Himmelsgewölbe regelmäfsig reflectirte in einer durch die Sonne gehenden Ebene stark polarisirt ist. Darauf gründet sich die Einrichtung einer Sonnenuhr, welche selbst dann noch ihre Dienste verrichtet, wenn die Sonne bereits unter den Horizont gesunken ist, die Dämmerung aber noch hell genug, um Farben unterscheiden zu können. An der Spitze eines etwas abgekürzten Kegels befindet sich ein Nicolsches Prisma, durch welches ein dünnes Gypsplättchen betrachtet wird, welches auf der Mitte der Grundfläche des Kegels aufgeklebt ist. Diese Grundfläche ist eine mit dem

beschweren, dafs man sagt, ein Stein fällt geradlinig herab, da er doch im Fallen einen prismatischen Raum durchläuft. Ist aber das Licht etwas anderes, als ein geradlinig Bewegtes? weifs nicht jedes Kind, dafs man nicht um die Ecke sehen kann?

Kegel drehbare Glasscheibe über einer zweiten nicht drehbaren, auf deren Umfang die Stunden so eingravirt sind, dafs zwölf in dem lothrechten Durchmesser liegt. Stellt man nun den Kegel so auf, dafs die Achse desselben mit der Weltachse zusammenfällt, so stellt der blaue Himmel einen Polarisationsspiegel dar, dessen Reflexionsebene durch die Achse des Instruments und die Sonne geht. Diese Reflexionsebene dreht sich innerhalb 24 Stunden im ganzen Kreise herum. Das Gypsplättchen ist nun so aufgeklebt, dafs, wenn der auf der beweglichen Glasplatte befindliche Zeiger nach der Sonne weist, es vollkommen farblos erscheint. Der Apparat wird also so lange gedreht, bis dies erfolgt, und der Zeiger zeigt dann die wahre Uhrzeit an. Das Licht der Cometen verhält sich wie das des blauen Himmels, es ist polarisirt, also reflectirt, das Licht der Fixsterne unpolarisirt. Hält man über ein Buch eine durchsichtige Glastafel so, dafs sie das Sonnenlicht stark reflectirt, so ist es unmöglich, wegen des blendenden Lichtes, das Buch zu sehen. Durch einen Turmalin betrachtet, verschwindet das reflectirte Sonnenlicht, und man liest die Schrift in voller Deutlichkeit. Betrachtet man ein auf einem Metallspiegel liegendes farbiges Glas mit blofsem Auge, so sieht man die Farbe nicht sehr lebhaft, da das von der Vorderfläche des Glases reflectirte weifse Licht den Eindruck des farbigen von der Hinterfläche zurück gesendeten schwächt. Hält man aber vor das die farbige Glasplatte unter dem Polarisationswinkel betrachtende Auge ein Nicol'sches Prisma so, dafs das von der Vorderfläche reflectirte Licht verschwindet, so tritt sogleich die Farbe des Glases in voller Intensität hervor. Steuert ein Schiff gerade der Sonne zu, so kann es, von dem Glanze geblendet, nicht die Klippe wahrnehmen, welche dicht unter der Wasser-

fläche ihm Untergang droht. Gebt dem wachthabenden Matrosen eine Turmalinplatte, und das Schiff ist gerettet.

Welche theoretische Vorstellungen man sich auch über diese Erscheinungen bilden möge, so wird es immer, auch abgesehen von praktischer Anwendung, als etwas Bedeutendes erscheinen, dafs wir Mittel besitzen, einem Weltkörper, welcher aus so grofser Ferne uns Licht zusendet, zu beweisen, dafs er nur mit erborgtem Glanze leuchtet. Die Verderben drohende Cometenfackel, von welcher das Mittelalter fürchtete, sie werde die Welt entzünden, ist erloschen vor dem mildern Lichte der Wissenschaft.

Die empirischen Kennzeichen eines polarisirten Strahles können wir dadurch zusammenfassen, dafs wir sagen, es lassen sich durch den Strahl zwei auf einander senkrechte Ebenen legen mit entgegengesetzten Eigenschaften, die in den zwischenfallenden Ebenen allmählig in einander übergehen. Wäre der Gegensatz zwischen jenen beiden Ebenen ein qualitativer, so würden wir von zwei Polarisationsebenen sprechen, wie wir bei den magnetischen und electrischen Erscheinungen einander zwei Magnetismen und ebenso zwei Electricitäten als Gegensätze gegenüber stellen. Dennoch hat auch die auf die Polarisationsebene senkrechte Ebene einen bestimmten Namen erhalten; Fresnel hat sie Schwingungsebene genannt, so dafs also die Polarisationsebene die nähere theoretische Definition erhält, dafs sie die Ebene sei, gegen welche die Schwingungen des Aethers lothrecht Statt finden. Ist nun unpolarisirtes Licht ein solches, an welchem sich keine bestimmte Polarisationsebene nachweisen läfst, so wird dies nichts anderes heifsen, als im unpolarisirten Licht geschehen die Schwingungen in allen möglichen auf den Strahl senkrechten Richtungen, bald in dieser, bald in jener. Daraus

folgt ferner, dafs wenn Licht, welches in allen möglichen, durch eine gerade Linie gelegten Ebenen polarisirt ist, in einem Punkt zusammentrifft, dieser Punkt dieselben Erscheinungen darbieten wird, als wäre er von unpolarisirtem Lichte beleuchtet. Dies habe ich dadurch erhalten, dafs ich Sonnenlicht parallel der Achse auf die Innenfläche eines abgekürzten gläsernen Hohlkegels fallen liefs, dessen Seitenfläche mit der Achse denselben Winkel bildete, als der ist, unter welchem das Licht auf die ebene, spiegelnde Glasfläche fallen mufs, um vollständig polarisirt zu werden. Von der physikalischen Beschaffenheit eines solchen Strahles werden wir uns demnach eine deutliche Vorstellung bilden, wenn wir uns an jenes horizontal gespannte Tau erinnern und dasselbe durch schnell auf einander folgende, auf die Länge des Taues senkrechte Stöfse in fortschreitende Schwingungen versetzt, diese Stöfse aber in allen möglichen Richtungen gegen den Horizont ihm ertheilt denken. Die Schwingungen dieses Taues werden den Schwingungen eines polarisirten Strahles entsprechen, wenn die auf einander folgenden Stöfse stets auf dieselbe Weise gegen den Boden geneigt sind. Bei einem polarisirten Strahle ist die Schwingungsebene an jeder Stelle dieselbe, bei einem unpolarisirten stets eine andere. Die Schwingungsrichtungen des erstern liegen sämmtlich in einer Ebene, wie die Sprossen einer Leiter, während der letztere einem Stamme zu vergleichen ist, dessen Aeste sich horizontal nach allen Richtungen verbreiten. Jene Leiter, deren Sprossen in einer Ebene liegen, verwandelt sich, geht polarisirtes Licht durch die Achse eines Bergkrystalls, in eine Wendeltreppe. Es giebt Bergkrystalle, welche in der Neigung ihrer Begrenzungsflächen vollkommen übereinstimmen, in der Aufeinanderfolge derselben sich aber so unter-

scheiden, wie die rechte Hand von der linken. Diese Krystalle unterscheiden sich auch nun, wie Herschel nachgewiesen hat, durch den entgegengesetzten Sinn, in welchem sie die Polarisationsebene drehen. In den Amethysten liegen, wie Brewster [1]) gezeigt hat, Individuen beider Gattungen im Sinne der Achse neben einander, an deren Begrenzungsstellen sich die Drehungen vollkommen aufheben. Endlich giebt es, wie ich gefunden habe [2]), krystallographisch unterscheidbare Bergkrystalle, in welchen jene Individuen im Sinne der Achse hinter einander liegen, in welchen also die Polarisationsebene sich zuerst in einem, dann im entgegengesetzten Sinne dreht. Das äufsere Kennzeichen dieser Krystalle ist entweder das Vorkommen von beiderlei Trapezflächen an demselben Individuum, oder eine, besonders bei den Dauphineer Bergkrystallen häufig sich zeigende Abwechselung matter und spiegelnder Stellen auf den Pyramidal- oder Säulenflächen der Krystalle, endlich die Abwechselung schwach grün und roth gefärbter Stellen. Die optischen Erscheinungen dieser natürlichen Combinationen rechts und links drehender Bergkrystalle sind später von Soleil künstlich nachgebildet worden, durch Verbindung zweier entgegengesetzt gerichteter Keile, von denen der eine aus einem rechts, der andere aus einem links drehenden Individuum geschnitten ist.

Vermag eine geringe Modification der Cohäsionsverhältnisse innerhalb derselben krystallinischen Substanz den Sinn

[1]) On circular polarisation as exhibited in the optical structure of the amethyst, with remarks on the distribution of colouring matter in that mineral. Edinb. Trans. 9, p. 139.

[2]) Ueber den Zusammenhang der optischen Eigenschaften der Bergkrystalle mit ihren äufsern krystallographischen Kennzeichen. Pogg. Ann. 40, 607.

jener Drehung zu ändern, so werden wir im voraus vermuthen können, dafs an der Grenze zweier unkrystallinischen Medien eine plötzliche Aenderung der Schwingungsebene sich zeigen wird. Dies findet immer Statt, wenn die Polarisationsebene des polarisirt einfallenden Lichtes nicht mit der durch den einfallenden, durch den gespiegelten und durch den gebrochenen Strahl gelegten Einfallsebene zusammen fällt. Machen beide Ebenen einen Winkel mit einander, so zeigt sich derselbe im gespiegelten Strahle kleiner, als im einfallenden, im gebrochenen hingegen gröfser. Da nun die nach allen möglichen, auf den Strahl senkrechten Richtungen geschehenden Schwingungen des unpolarisirten Lichtes stets auf zwei auf einander senkrechte Bewegungen zurückgeführt werden können, oder mit andern Worten, da, erfahrungsmäfsig und nach diesen theoretischen Vorstellungen, unpolarisirtes Licht sich stets so verhält, wie zwei ungetrennte gleiche Mengen auf einander senkrecht polarisirten Lichtes, so erhält man eine sehr deutliche Anschauung des Actes der Polarisation, in so fern durch die Reflexion die Neigung jener beiden Polarisationsebenen sich vermindert, durch die Brechung hingegen sich vergröfsert, bis nach einmaliger oder vielfacher Wiederholung jener Ablenkung endlich beide Schwingungsebenen in eine zusammenfallen. Dies Zusammenfallen tritt bei einmaliger Reflexion unter einem bestimmten Winkel ein, welcher daher der Polarisationswinkel heifst, unter andern Winkeln erst nach mehrfacher Reflexion [1]). Durch einmalige Brechung kann es nie erreicht werden, sondern nur durch vielfache Wiederholung der dabei eintre-

[1]) Nach den Versuchen von Brewster wird auf Glas, welches das Licht nach einmaliger Reflexion unter dem Winkel von 56° 45′ polarisirt, dieselbe Erscheinung hervorgebracht:

tenden kleinen Ablenkungen. Es bedarf daher einer gröfsern Anzahl parallel hinter einander geschichteter, durchsichtiger Scheiben, um das Licht zu polarisiren [1]). Da aber die Drehung der Polarisationsebene mit der brechenden Kraft der angewendeten Substanz zunimmt, so erreicht man bei stärker brechenden Medien unter gleichem Einfallswinkel durch eine geringere Anzahl Platten die vollständige Polarisation, welche aber eigentlich auf diesem Wege in mathematischer Strenge nie erreicht werden kann, für das wahrnehmende Auge aber bei einer bestimmten Anzahl stets vorhanden ist. Bei senkrechter Incidenz fallen alle drei Strahlen zusammen; die Richtung der stets lothrechten Einfallsebene ist daher beliebig, das gespiegelte und das gebrochene Licht deswegen unpolarisirt.

Fällt intensives Sonnenlicht auf einen eben geschliffenen Spiegel, so wird es zwar nach einer Richtung mit gröfster Intensität reflectirt, man sieht aber auch nach andern Richtungen einen hellen Fleck auf dem Spiegel. Dieses nach

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| durch | 2 | Reflexionen | unter | dem | Winkel | 50° | 26′ | und | 62° 30′ |
| » | 3 | » | » | » | » | 46° | 30′ | » | 65° 33′ |
| » | 4 | » | » | » | » | 43° | 51′ | » | 67° 33′ |
| » | 5 | » | » | » | » | 41° | 43′ | » | 69° 1′ |
| » | 6 | » | » | » | » | 40° | | » | 70° 9′ |
| » | 7 | » | » | » | » | 38° | 33′ | » | 71° 5′ |
| » | 8 | » | » | » | » | 37° | 20′ | » | 71° 51′ |

[1]) Wie mit zunehmender Schiefe der Säule von Glasscheiben gegen das einfallende Licht die zur vollständigen Polarisation erforderliche Anzahl derselben sich vermindert, geht aus folgenden Versuchen von Brewster hervor, bei welchem der Gegenstand ein 10 bis 12 Fufs entferntes Wachslicht war:

Anzahl der Scheiben von Crownglas: 8, 12, 16, 21, 24, 27, 31, 35, 41, 47.

Einfallswinkel: 79° 11′, 74° 0′, 69° 4′, 63° 21′, 60° 8′, 57° 10′, 53° 28′, 50° 5′, 45° 35′, 41° 41′.

allen Seiten hin verstreute Licht zeigt sich mit einem Turmalin untersucht stets in der Reflexionsebene polarisirt, in welcher man es grade wahrnimmt. Diese Erscheinung bildet den vollkommenen Uebergang zu der Erklärung des Grundes, warum rauhe Flächen das polarisirte Licht depolarisiren, und directes Licht unpolarisirt verstreuen. Von der depolarisirenden Wirkung rauher Flächen kann man sich einfach überzeugen, wenn man das durch ein doppelbrechendes Prisma entstehende Spectrum zuerst unmittelbar oder, nachdem es vorher auf eine rauhe Fläche gefallen war, durch eine Turmalinplatte oder ein Nicol'sches Prisma betrachtet. Im erstern Falle verschwindet nämlich bei der Drehung der Turmalinplatte um einen Viertelkreis stets eins der Bilder, diese sind also senkrecht auf einander polarisirt. Werden hingegen beide auf eine weifse Wand oder einen Bogen Papier projicirt, so behalten beide Bilder bei der Drehung der Turmalinplatte unverändert ihre Helligkeit, sind also unpolarisirt, und heifsen depolarisirt, weil das auf die Wand auffallende Licht, wie der subjective Versuch beweist, polarisirt war. Eben derselbe Unterschied zeigt sich zwischen den unmittelbar mit dem Auge betrachteten, und den auf eine Wand projicirten Ringsystemen, welche im polarisirten Licht um die Achsen der Krystalle entstehen. Da nun Pigmente Licht in das Auge senden, welches sich genau so verhält, als das unregelmäfsig verstreute rauher Flächen, so sieht man leicht, dafs es optische Erscheinungen giebt, welche wesentlich verschieden sind von der treusten Nachbildung derselben durch Pigmente.

Bestände der Act des Polarisirens in einer Modification einer longitudinalen Schwingung, so müfste auch die Art der Erschütterung der Netzhaut eine verschiedene sein, je

nachdem sie durch polarisirtes oder durch unpolarisirtes Licht hervorgebracht wird. Das wahrnehmende Auge müfste sich also auch eines Unterschiedes zwischen beiden bewufst werden. Bestände das Polarisiren im Sinne des Emanationssystems in einem Anordnen bestimmt gestalteter Lichttheilchen, so würden im unpolarisirten Lichte andere Flächen dieser Theilchen die Netzhaut berühren, als im polarisirten, der Erfolg müfste daher derselbe, wie unter der vorigen Annahme sein. Im Sinne der neuern Wellentheorie erschüttern die der Netzhaut parallel laufenden Querschwingungen aber alle auf gleiche Weise die Netzhaut. Das einzig Unterscheidende ist die Richtung dieser tangentialen Bewegung. Die Kunst des Bauchredners überzeugt uns, wie wenig unser Organ fähig ist, über die Richtung, von welcher aus das Trommelfell erschüttert wird, zu urtheilen. Die Richtung des Schallstrahles bei longitudinalen Schwingungen verhält sich aber grade so, wie die durch die Polarisationsebene bestimmte Schwingungsrichtung innerhalb der Lichtwellen. Es scheint daher natürlich, dafs das Auge im Allgemeinen weder die Fähigkeit besitzt, die Richtung, in welcher polarisirtes Licht polarisirt ist, zu unterscheiden, noch die, sich eines Unterschiedes zwischen polarisirtem und unpolarisirtem Lichte bewufst zu werden. Die Netzhaut des dem Lichte zugewendeten Auges fängt die Schwingungen so auf, wie sie auf eine senkrecht gegen den Strahl gehaltene Glasplatte fallen. In Beziehung auf diese verhält sich aber, wie wir gesehen haben, polarisirtes und unpolarisirtes Licht vollkommen gleich. Das eben Gesagte würde in voller Strenge gelten, wenn die durchsichtigen Medien des Auges, welche das Licht durchstrahlt, ehe es die Netzhaut trifft, ohne alle polarisirende Wirkung wären. Dies ist aber wahrscheinlich

nicht der Fall, und so erklärt sich, dafs wenn man eine ausgedehnte Fläche polarisirten Lichtes, wie etwa den blauen Himmel, betrachtet, auf dieser in einer freilich für verschiedene Individuen sehr ungleichen Deutlichkeit die von Haidinger zuerst wahrgenommenen gelblichen Büschel erscheinen, aus deren Richtung auf die Polarisationsebene des Lichtes geschlossen werden kann [1]).

Bei doppelt brechenden einachsigen Körpern, in welchen nur einer der beiden gebrochenen Strahlen, der sogenannte ordentliche, mit dem einfallenden und gespiegelten in eine Ebene zusammenfällt, der andere hingegen, der sogenannte aufserordentliche, aus ihr heraustritt, werden natürlich jene die Schwingungsrichtung ablenkenden Kräfte, welche bei einfach brechenden Körpern nur von der Einfallsebene ausgehen, noch durch die Lage des Hauptschnittes bestimmt, d. h. durch die Lage einer Ebene, welche durch die Richtung, in welcher sie das Licht nicht verdoppeln, senkrecht auf die Einfallsfläche gelegt wird. Diese Bestimmungen sind in den zweiachsigen Krystallen, in welchen das Licht in zwei aufserordentlichen Strahlen sich theilt, noch allgemeiner, weil hier durch die zwei Richtungen, in welchen sie das Licht nicht verdoppeln, aufser der durch sie gelegten Ebene noch zwei andere bestimmt werden, welche jene erste in den beiden Halbirungslinien des Winkels beider Achsen senkrecht schneiden. Daher erklärt sich auch, warum das durch Spiegelung von krystallinischen Substanzen polarisirte Licht nicht immer in der Einfallsebene polarisirt ist, und es ist das ein schöner Beleg dafür, dafs das bei der Spiegelung scheinbar dem Körper nur äufserlich bleibende

[1]) Ueber das directe Erkennen des polarisirten Lichtes und der Lage der Polarisationsebene. Pogg. Ann. 63, p. 29.

Licht, doch von der Gesammtheit der in ihm thätigen Cohäsionsverhältnisse ergriffen wird. Anderseits ist es aber auch ein Beweis der hohen Vollendung unserer jetzigen Beobachtungsweise, dafs wir zum Lichte nicht nur sagen können, du warst schon an einem Körper, sondern auch welcher Art dieser Körper ist. So wird auf den Schwingen des Lichtes das Unerreichbare zugänglich.

Nur doppelbrechende Körper geben im Polarisationsapparate zu Farbenerscheinungen Veranlassung. Diese zu übersehen, müfsen noch einige Worte über Doppelbrechung gesagt werden.

Unkrystallisirte Substanzen, wie Glas, Gase und tropfbare Flüssigkeiten, ebenso Krystalle des regulären Systems, d. h. solche Krystalle, deren Flächen um drei auf einander senkrechte gleichartige Achsen symmetrisch vertheilt sind, geben keine Doppelbilder. Temperaturveränderungen unterworfen, bleiben sie sich ähnlich, dehnen sich also nach allen Richtungen gleichförmig aus. In tönende Schwingungen versetzt, zeigen sie nach allen Seiten hin gleiche Elasticität. Das Licht pflanzt sich in ihnen nach dem Gesetze von Snellius fort, d. h. nach allen Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit: die Wellenfläche desselben ist daher eine Kugel.

Prefst man eine Glasscheibe in einer Schraube, so verwandelt sie sich sogleich in einen doppelt brechenden Körper. Sie giebt nun zwischen den Spiegeln des Polarisationsapparates Farben, die sich symmetrisch um die Pressungsachse ordnen. Erhitzt man ein Glas auf die Weise, dafs die Wärme sich von einer der begrenzenden Flächen aus allmählig in das Innere verbreitet, so treten analoge Erscheinungen hervor. Die ungleiche Ausdehnung der stärker und der weniger erwärmten Theile bedingt hier die Spannung, welche dort

durch einseitige Pressung hervortrat. Ist der Körper überall gleichmäfsig erhitzt, so verschwinden die Farben, eben so bei dem gleichmäfsigen Abkühlen. Geschieht aber dasselbe ungleich, so fixirt sich jener Spannungsunterschied, gekühltes Glas ist nun doppelbrechend. Die prachtvollen, ihrer Form nach durch die Gestalt des Umfanges bestimmten Farbenerscheinungen gekühlter Gläser sind von Brewster [1]) und Seebeck [2]) im Jahre 1812 gleichzeitig entdeckt worden.

Eine gegen den polarisirten Strahl senkrecht gehaltene Klangscheibe von Glas wirkt nicht auf das Licht, wenn sie in transversale, der Richtung des Strahles parallele Schwingungen versetzt wird. Zu longitudinalen Tönen erregt, also in Querschwingungen in Beziehung auf die Richtung des Strahles begriffen, ist sie ein doppelbrechender Körper. Man verdankt Biot [3]) diesen schönen Versuch.

Die Krystalle des zwei- und einachsigen oder rhomboedrischen und drei- und einachsigen oder pyramidalen Systems, bei welchen eine Achse ungleichartig sich zwei

[1]) Result of some recent experiments on the properties impressed upon light by the action of glass raised to different temperatures and cooled under different circumstances. Ph. Tr. 1814, p. 436. — additional observations on the optical properties and structure of heated glass and unannealed glass drops. Ph. Tr. 1818, p. 1. — on new properties of heat as exhibited in its propagation along plates of glass. Ph. Tr. 1816, p. 46. — on the laws which regulate the distribution of polarizing force in plates, tubes and cylinders of glass, that have received the polarizing structure. Edinb. Trans. 8, p. 353.

[2]) Einige neue Versuche und Beobachtungen über Spiegelung und Brechung des Lichtes. Schweigg. Journ. 7, p. 284, von den entoptischen Farbenfiguren und den Bedingungen ihrer Bildung in Gläsern.

[3]) Sur une nouvelle propriété physique, qui acquièrent de verres, quand elles executent des vibrations longitudinales. Ann. de Ch. et de Ph. 13, p. 151.

oder drei auf ihr senkrechten, gleichartigen gegenüberstellt, verdoppeln das Licht nach allen Richtungen, ausgenommen nach der Richtung jener ungleichartigen Achse. Sie heifsen daher optisch einachsig. Die in tönenden Schwingungen sich aussprechende Elasticität ist in ihnen nach Savart's Versuchen in allen auf jene Achse senkrechten Richtungen gleich, aber zu- oder abnehmend nach der Achse hin, in der sie also am gröfsten oder kleinsten wird. Dasselbe gilt nach Mitscherlich von der Ausdehnung durch die Wärme. Eine aus einem solchen Körper gefertigte Kugel bleibt daher, einer höhern Temperatur ausgesetzt, nicht sphärisch, wie bei Krystallen des vorigen Systems, sondern sie wird ein Sphäroid, dessen verlängerte oder verkürzte Achse mit der krystallographischen zusammenfällt. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes von einem Punkte der Oberfläche eines solchen Krystalls in das Innere wird für das ungewöhnlich gebrochene Licht nach dem Gesetze von Huyghens dargestellt durch ein um die Krystallisationsachse als Achse beschriebenes Sphäroid, und ist ein verlängertes in den sogenannten positiven Krystallen, z. B. im Zircon, hingegen abgeplattet in den negativen, wie im Kalkspath. Wie innig die Wirkung krystallinischer Medien auf das Licht mit den die äufsere Gestalt der Krystalle bedingenden Cohäsionskräften zusammenhängt, geht daraus hervor, dafs, wenn durch gesteigerte Wärme die rhomboedrische Form des Kalkspaths sich der cubischen des regulären Systems immer mehr anschliefst, die nach verschiedenen Richtungen verschiedene Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes sich auch fortwährend der Gleichheit nähert.

Alle Krystalle, deren Flächen um drei ungleichartige Achsen symmetrisch vertheilt erscheinen, sind optisch

zweiachsig, d. h. es giebt in ihnen zwei Richtungen, in welchen sie Licht, welches sie durchstrahlt, nicht verdoppeln. Obgleich die Elasticität derselben auf akustischem Wege bisher nicht direct untersucht worden ist, so ist doch empirisch ermittelt, dafs ihre thermische Ausdehnung nach drei auf einander senkrechten Richtungen verschieden ist, so dafs eine aus einer solchen Substanz geschliffene Kugel bei erhöhter Temperatur sich in ein dreiachsiges Ellipsoid verwandelt. Das Gesetz der Fortpflanzung des Lichtes in denselben ist durch Fresnel gegeben, unter der Voraussetzung einer nach jenen drei Richtungen verschiedenen Elasticität. Die Richtung und Polarisation beider durch Doppelbrechung entstehenden Strahlen für jeden beliebigen Einfallswinkel wird genau durch die Gestalt der Wellenfläche bestimmt, welche Gestalt aufserdem zu dem sonderbaren Schlusse führt, dafs ein in einer bestimmten Richtung von Aufsen eintretender und ein in einer bestimmten Richtung von Innen austretender Strahl, sich nicht in zwei Strahlen theilt, sondern sich in einen Lichtkegel öffnet. Diese erst nach Fresnels Tode von Hamilton an der Fresnel'schen Wellenfläche entdeckte Eigenschaft ist durch Lloyds Versuche bestätigt worden, und es ist dies eine der vielen am Lichte entdeckten Eigenschaften, welche nur auf theoretischem Wege gefunden werden konnten und ohne jenes aufserordentliche Genie wohl noch lange unbekannt geblieben wären. Man sieht aufserdem leicht, dafs das Fresnel'sche Gesetz in sich das von Huyghens und Snellius als einfachere Fälle enthält, d. h. dafs es sich in diese verwandelt, wenn die zuerst nach den drei auf einander senkrechten Richtungen verschiedene Elasticität nun in zweien und zuletzt in allen dreien gleichgesetzt wird. Die begleitenden physischen Erscheinungen

würden sein: das Zusammenfallen der beiden optischen Achsen in eine und das endliche Verschwinden auch dieser, oder, für die durch Doppelbrechung entstehenden Strahlen ausgesprochen, würde von den beiden aufserordentlichen zuerst einer sich in einen ordentlichen verwandeln, dann auch der andre.

Polarisirtes die Achse durchlaufendes Licht giebt unmittelbar zu Farbenerscheinungen keine Veranlassung. Wird es aber analysirt, so zeigen sich um die Achse einachsiger Krystalle die Newton'schen Farbenringe vollkommen kreisförmig. Ist die analysirende Vorrichtung ein doppelt brechender Körper, dessen Hauptschnitt mit der Polarisationsebene zusammenfällt, so erscheinen neben einander die reflectirten und die durchgelassenen Newton'schen Ringe, jene durchschnitten von einem schwarzen, diese von einem weifsen Kreuze [1]), die Farben an allen Stellen vollkommen complementar. Da nun die farblose Platte vor jener Sonderung in der weifsen Beleuchtung vollkommen weifs erschien, jetzt aber, wo in dem einen Bilde weifs sich zeigt, dort schwarz erscheint, hingegen, wo in dem einen Bilde eine bestimmte Farbe bemerkt wird, auf dem andern die complementare sich darstellt, so folgt entschieden, dafs die Farbe erzeugt wird durch eine theilweise Verdunkelung des Weifsen, oder mit andern Worten, dafs am Weifs nur dann Farbe hervortreten kann, wenn der unterdrückte Theil des Weifsen, für sich

[1]) Zwischen den Spiegeln mit gekreuzten Reflexionsebenen, oder zwischen Turmalinen mit gekreuzten Achsen erscheint allein das reflectirte System mit dem schwarzen Kreuze, dessen Arme jenen auf einander senkrechten Richtungen entsprechen. Das weifse Kreuz wird sichtbar, wenn die Reflexionsebenen der Spiegel oder die Achsen der Turmaline zusammenfallen. Die Ringe sind dann die durchgelassenen Newton'schen.

zur Erscheinung gebracht, selbst farbig, d. h. keine blofse Verdunkelung ist.

Dieselbe Analyse kann noch auf eine auffallendere Weise gemacht werden. Eine durchsichtige Glasplatte wird zuerst lothrecht auf den polarisirten Strahl gehalten. Man sieht dann die auf die Achse senkrecht geschliffene Krystallscheibe vollkommen farblos. Nun neigt man allmählig die Platte immer stärker gegen den Strahl, und zwar so, dafs seine Einfallsebene mit der Reflexionsebene zusammenfällt. Sogleich erblickt man bei dem Durchsehen durch die Platte das Ringsystem mit dem schwarzen Kreuze, bei dem Sehen auf die Platte das complementare Ringsystem mit dem weifsen Kreuze. Steht hingegen die Einfallsebene senkrecht auf der Polarisationsebene, so sieht man nun durch Brechung das, was man vorher durch Spiegelung wahrnahm, und umgekehrt.

Um die am ganzen Ringsysteme bemerkten Erscheinungen für eine der Farben isolirt zu untersuchen, wählen wir die lebhaften Farben, welche im Polarisationsapparate an Glimmerblättern hervortreten.

Betrachtet man eine runde Oeffnung, welche von directem weifsem Lichte beleuchtet ist, durch ein Kalkspathrhomboeder, so sieht man bei der Drehung desselben stets zwei Bilder gleicher Helligkeit, von denen das eine um das andere sich bewegt. Wo sie über einander greifen, ist die Helligkeit doppelt, die beiden etwas ins Graue spielenden Bilder zeigen sich daher hier vollkommen weifs. Beleuchtet man die Oeffnung nun durch polarisirtes Licht, so verschwindet bei jeder Vierteldrehung abwechselnd eins der Bilder vollkommen und durchläuft alle Zwischengrade der Helligkeit in einem vom Drehungswinkel abhängigen Verhältnifs. Ist der Haupt-

schnitt daher um ein Achttheil eines Kreisumfanges von der Polarisationsebene entfernt, so sind die beiden Bilder gleich hell. Ich schalte nun ein Blatt zweiachsigen Glimmers senkrecht auf den polarisirenden Strahl ein und drehe dasselbe in seiner Ebene, bis beide Bilder so erscheinen, als wenn das Glimmerblatt nicht da wäre [1]). Nun drehe ich die Platte weiter, und beide Bilder erscheinen jetzt intensiv complementar gefärbt, da aber, wo sie über einander greifen, vollkommen weifs; verkleinere ich die Oeffnung so weit, dafs die Bilder nicht mehr über einander greifen, oder schiebe ich dieselbe Oeffnung weiter vom Auge fort, bis zuletzt beide Bilder ganz aus einander treten, so sind beide durch und durch complementar gefärbt. Diese Versuche zeigen also, dafs ich dasselbe Licht theilen kann in zwei Mengen farblosen Lichtes von gleicher und bis zum Verschwinden des einen verschiedener Helligkeit, aufserdem aber auch in Farbe und Farbe, und zwar beides, wenn dieselbe Beleuchtung hindurchscheint durch denselben durchsichtigen Körper, der gegen das Licht immer auf gleiche Weise geneigt ist. Es kann also nicht die Trübung als solche das Princip der Entstehung der Farbe sein.

Was nun die Ableitung der um die Achse einachsiger Krystalle entstehenden Farbenringe betrifft, so wird es genügen, zu bemerken, dafs die zum Krystallblättchen hinaustretenden ordentlichen und aufserordentlichen Lichtbündel in ihrem Gange genau um eben so viel verschieden sind, wie die Strahlen, welche an der ersten und zweiten Fläche einer

[1]) Die im Glimmer gesehenen Farben erscheinen noch lebhafter, wenn man statt desselben in den Weg der polarisirt einfallenden Lichtstrahlen eine sehr dünne Bergkrystallplatte einschaltet, so geschliffen, dafs die Achse des Bergkrystalls in der Ebene der Platte liegt.

Luftschicht, welche dieselbe Farbe giebt, reflectirt werden. So wie dort das stärker lichtbrechende Wasser an die Stelle der Luft zwischen den Glasplatten eingeschaltet die Ringe verengert, so geschieht hier dasselbe bei gröfserer, doppeltbrechender Kraft des Krystallblättchens, d. h. bei gröfserer Differenz der Fortpflanzungsgeschwindigkeit in der Achse und in der auf ihr senkrechten Richtung. Bei gleicher Dicke giebt daher eine Platte von Kalkspath viel engere Ringe, als eine Platte von Beryl, Turmalin oder Zircon. Da bei zunehmender Dicke der Platte der Gangunterschied der interferirenden Strahlen gröfser werden mufs, so verengern sich in entsprechendem Verhältnisse die Ringe mit zunehmender Dicke. Man kann also aus zwei Substanzen von ungleicher Doppelbrechung, durch Wahl einer angemessenen Stärke, Scheiben erhalten, welche gleichweite Ringe geben. Legt man zwei solcher Platten von zwei negativen Krystallen zusammen, so erhält man dieselbe Verengerung, als wenn man jede Platte einzeln verdoppelt hätte. Dasselbe gilt für zwei Platten positiver Krystalle. Legt man aber die positive Platte auf die negative, so erscheinen beide zusammen farblos.

Diese auffallende Erscheinung erklärt sich nach dem Interferenzprincipe sehr einfach dadurch, dafs der in dem ersten Krystalle zurückbleibende Strahl im zweiten um so viel beschleunigt wird, wie der im ersten vorschreitende im zweiten verzögert wird, überall also Coincidenz eintritt, sämmtliche Interferenzfarben daher verschwinden. Da aber die neben einander gehaltenen Platten ganz dieselben Farbeneindrücke hervorbringen, so wird in der That Schwarz auf Schwarz gelegt, Weifs auf Weifs, Roth auf Roth etc. und das giebt Weifs.

Da senkrecht auf einander polarisirtes Licht nicht interferirt, diese Eigenschaft aber erhält, wenn es, vorher auf eine Schwingungsebene zurückgeführt, nach der Trennung wieder in eine zurückkehrt, so sieht man den Grund ein, warum die durch Doppelbrechung entstehenden Interferenzphänomene nur dann eintreten, wenn polarisirt einfallendes Licht nach seinem Austritt aus dem Krystalle analysirt wird. Ebenso ist es klar, warum in der Polarisationsebene und senkrecht auf dieselbe ein farbloses Kreuz erscheint, da hier die Erscheinung unabhängig von der Wellenlänge der einzelnen Farben wird, also für alle Coincidenz oder Interferenz eintreten mufs, d. h. Weifs oder Schwarz sich zeigt.

Schleift man eine Platte aus einem zweiachsigen Krystalle senkrecht auf die Halbirungslinie des Winkels, welchen beide optische Achsen mit einander bilden, so erblickt man im Polarisationsapparate die Farbencurven als zwei von einander völlig getrennte Systeme, um jene Achsen, wenn jener Winkel nämlich, wie bei Arragonit und Topas, grofs ist, sieht sie hingegen in Form einer liegenden Acht beide umschlingen, wenn der Winkel klein ist, wie z. B. bei dem Salpeter. Von der Regelmäfsigkeit der lemniscatenförmig gekrümmten, dunkeln Interferenzlinien in der Beleuchtung einer homogenen, gelben Flamme ist es schwer, sich ohne Anschauung eine Vorstellung zu bilden; man glaubt die mikroskopische Darstellung des zartesten Organismus vor sich zu sehen. Beide Ringsysteme zwischen den gekreuzten Turmalinen betrachtet, sind auch bei weifser Beleuchtung von dem Arme eines schwarzen Kreuzes diametral durchschnitten, dessen anderer Arm lothrecht in der Mitte zwischen beiden Systemen hindurchgeht. Auch hier sind diese dunkeln Büschel parallel

den Achsen der Turmaline. Dreht man die Platte in ihrer Ebene, so löst sich das schwarze Kreuz in zwei getrennte Hyperbeln auf. Da diese Farbencurven, so wie die hyperbolisch gekrümmten, welche in andern Richtungen des Krystalls erscheinen, sich eben so, wie bei einachsigen Krystallen, auf die Interferenz der beiden durch Doppelbrechung getrennten Lichtmengen zurückführen lassen, so wollen wir an ihnen nur nachweisen, wie die in weifser Beleuchtung wahrgenommenen Erscheinungen nur zu enträthseln sind, wenn wir sie vorher in homogener Beleuchtung untersucht haben.

Betrachtet man das kreisförmige Ringsystem eines einachsigen Krystalls in den verschiedenen homogenen Beleuchtungen des Spectrums, oder bei verschieden gefärbten Flammen, so sieht man ganz dieselben Veränderungen der Durchmesser der Ringe, wie wir sie bei den reflectirten Newtonschen Ringen ausführlich besprochen haben. Das Centrum aller Ringsysteme ist hier wie dort genau dasselbe, wie man beim Einschalten eines durch Kobalt gefärbten Glases an der prachtvollen Abwechselung intensiv rother, blauer, violetter und schwarzer Ringe sieht, die Farbenfolge in weifser Beleuchtung also in beiden Fällen vollkommen übereinstimmend [1]). Bestimmt man hingegen für eine gegebene Platte eines zweiachsigen Krystalles in einer bestimmten

[1]) Eine auffallende Abweichung von dieser Farbenfolge zeigt sich in dem Apophyllit von Cipit in Tyrol, und dieser Krystall giebt einen sehr überzeugenden Beleg dafür, dafs die an der hellen Stelle zusammenfallenden Ringe der homogenen Farben Weifs erzeugen. Es ist nämlich klar, dafs wenn die in den verschiedenen homogenen Farben gesehenen Ringe genau gleichen Durchmesser hätten, in weifser Beleuchtung nur Abwechselungen von weifsen und schwarzen Ringen erscheinen müfsten. Diese Gleichheit ist nun, wie seine Beobachtung

homogenen Beleuchtung die Lage der Mittelpunkte der beiden Ringsysteme, so findet man, dafs sie für eine andere Farbe eine andere ist. Die für verschiedene Farben entstehenden hellen und dunkeln Linien, von denen wir die erstern isochromatische Curven nennen können, sind also concentrisch in einachsigen Krystallen, hingegen excentrisch in zweiachsigen. Daraus folgt also, dafs die in weifser Beleuchtung erhaltene Farbenfolge der Ringsysteme zweiachsiger Krystalle abweicht von der Farbenfolge der Newton'schen, ja diese Abweichung ist oft so stark, dafs man einen Ring ganz deutlich aus mehreren, verschiedenfarbigen Bogen, die sich auf verschiedene Mittelpunkte beziehen, zusammengesetzt sieht. Diese in weifser Beleuchtung oft ganz den Charakter der Regelmäfsigkeit verlierenden Erscheinungen lösen sich bei Betrachtung in homogen farbiger Beleuchtung in ihre einfach übersichtlichen Elemente auf. Denken wir uns Licht in der Achse eines einachsigen Krystalles sich fortbewegend nun durch eine Begrenzungsfläche dieses Krystalles in die Luft austreten, so wird es, wenn diese senkrecht auf der Achse steht, seine Richtung ungeändert fortsetzen. Ist hingegen eine Platte eines zweiachsigen Krystalls senkrecht auf die Halbirungslinie des Winkels zwischen beiden Achsen geschliffen, so wird das Licht, welches die ge-

in den homogenen Farben des Spectrums zeigt, bei dem Apophyllit sehr nahe vorhanden, die Ringe im Grün sind etwas kleiner, als die der übrigen Farben, die von Blau und Indigo genau gleich, die vom Violett hingegen etwas gröfser als die vom Roth. Die Uebergänge der weifsen in die schwarzen Ringe geschehen bei weifser Beleuchtung durch gelbliches, grünes und dunkles Violett. Ihre Anzahl ist bedeutend gröfser, als bei den die Farbenfolge der Newton'schen Ringe befolgenden Krystallen, wovon der Grund unmittelbar einleuchtend ist.

gen die Austrittsfläche geneigten Achsen durchläuft, bei dem Austritt in die Luft von der lothrechten Halbirungslinie ab gebrochen werden. Man wird also, um das Ringsystem zu sehen, schiefer als in der Richtung der Achsen auf die Austrittsfläche sehen müssen oder, mit andern Worten, der scheinbare Achsenwinkel wird gröfser sein als der wahre. Dieser Unterschied ist so bedeutend, dafs nach Brewster bei dem farblosen Topas der Winkel zwischen den wahren Achsen 65° beträgt, während der scheinbare Winkel 121° 16′ ist.

Nach ihren krystallographischen Kennzeichen zerfallen die optisch zweiachsigen Krystalle in drei Klassen, je nachdem von den drei ungleichartigen krystallographischen Achsen jede lothrecht ist auf der durch die beiden andern bestimmten Ebene, oder eine oder keine [1]). Bei den Krystallen der ersten Klasse liegen die den verschiedenen Farben entsprechenden optischen Achsenpaare sämmtlich in einer Ebene zu beiden Seiten einer gemeinsamen Halbirungslinie. Bei den Krystallen des zweiten Systemes liegen hingegen jene Achsenpaare entweder in verschiedenen Ebenen um dieselbe Halbirungslinie, oder in einer Ebene um verschiedene Halbirungslinien, bei dem dritten in verschiedenen Ebenen um verschiedene Halbirungslinien. Während daher in dem ersten, dem prismatischen Systeme, die Ringe, welche die eine Achse umgeben, vollkommen übereinstimmen mit denen, welche die andere Achse umschliefsen, und beide von schwarzen Büscheln durchschnitten werden, sind in den

[1]) Der erste Fall tritt ein bei den Krystallen des ein- und einachsigen oder prismatischen Systems, der zweite bei denen des zwei- und eingliedrigen oder hemiprismatischen, der dritte bei denen des ein- und eingliedrigen oder tetartoprismatischen.

beiden letzten Krystallisationssystemen, dem hemiprismatischen und tetartoprismatischen, die Ringsysteme beider Achsen unter einander verschieden, und werden von verschiedenfarbigen Büscheln durchschnitten, von welcher Erscheinung, die Nörrenberg entdeckt und Neumann erläutert hat, der Gyps eins der schönsten Beispiele zeigt.

Von der im weifsen Lichte räthselhaften Complication der Farbenfolge in den Ringen des Borax leuchtet sogleich der Grund ein, wenn man sie durch ein, mittelst Kobalt gefärbtes Glas betrachtet, welches die Mittelfarben des Spectrum verlöscht, während es durchsichtig ist für rothes und blaues Licht. Man sieht dann vier Ringsysteme, nämlich zwei blaue und zwei rothe. Verbindet man die Mittelpunkte der rothen und ebenso die Mittelpunkte der blauen Ringe, so schneiden sich diese Verbindungslinien. Im salpetersauern Quecksilber liegen hingegen diese verschiedenen Systeme nicht diagonal einander gegenüber, sondern neben einander, so dafs jene Verbindungslinien sich nicht schneiden. Im Glauberit endlich ist bei gewöhnlicher Temperatur der Winkel der Achsen im rothen Lichte fünf Grad, in den darauf folgenden Farben wird er immer kleiner, bis im violetten Lichte beide Achsen zusammenfallen. Dieser Krystall zeigt also in einer bestimmten Beleuchtung die Ringsysteme eines zweiachsigen Krystalls, in einer andern die eines einachsigen; gewährt in weifser Beleuchtung daher einen vollkommen anomalen Anblick. Erkältet man den Krystall allmählig, so öffnen sich die Winkel der einzelnen Achsenpaare immer mehr, so dafs schon bei dem Frostpunkte der Krystall zweiachsig für alle Farben wird. Erhöht man hingegen die Temperatur des Krystalles, so fällt eines der Achsenpaare nach dem andern zusammen und öffnet sich dann in einer auf seiner vorigen

senkrechten Ebene. Noch weit unter der Siedhitze des Wassers haben sich alle Achsen wieder geöffnet, die Aufeinanderfolge der einzelnen ist aber nun grade die umgekehrte der früheren, die Farbenerscheinungen in weifser Beleuchtung sind daher diesem entsprechend verändert [1]).

Wenn nun solchen Erscheinungen gegenüber die Physiker, selbst nach dem Erscheinen von Goethe's Farbenlehre, sich nicht haben entschliefsen können, abzugehen von der früher befolgten Weise, die Erscheinungen in homogener Beleuchtung als Ausgangspunkt bei der Beurtheilung der Phänomene in weifser Beleuchtung zu wählen, so möchte doch wohl ein Zweifel erlaubt sein, ob, wie behauptet worden ist, »der Grund darin gelegen habe, dafs die Gedankenlosigkeit und Einfältigkeit, die man eingestehen sollte, gar zu grofs war« [2]). Sollte sich nicht vielleicht nach den bisher besprochenen Thatsachen auch selbst die Frage beantworten: »warum diese ungereimten Vorstellungen noch durch die Polarisation des Lichtes, durch die wieder aufgenommenen Newton'schen Anwandlungen und weiteren metaphysischen Gallimathias vermehrt worden?« Ein solcher, 25 Jahre nach Aufstellung des Princips der Interferenz, welches jene Anwandlungen für immer beseitigte, wiederholter Ausspruch, zu einer Zeit gethan, wo Biot's Theorie der *polarisation mobile* durch Fresnel bereits vollkommen widerlegt war, mufs wenigstens als Anachronismus auffallen, oder erstreckt sich etwa »die Gründlichkeit der Goethe-

[1]) Brewster account of a remarkable peculiarity in the structure of Glauberite, which has one axis of double refraction for violet and two for red light. Edinb. Trans. 11, p. 273. Pogg. Ann. 21, p. 607.

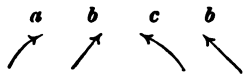
[2]) Hegel Encyclopaedie der philosophischen Wissenschaften p. 306.

schen Beleuchtung dieser Finsternifs im Licht« auch auf die entoptischen Farben, von denen gesagt wird, dafs man bei ihrem Anblicke vor lauter Schauen und Bewundern gar nicht zum Theoretisiren komme?

Durch die Annahme von Querschwingungen haben wir uns in der wundervollen Mannigfaltigkeit der Polarisationserscheinungen zurecht gefunden und zugleich den Grund eingesehen, warum senkrecht auf einander polarisirtes Licht nicht interferirt. Wenn aber solche unter rechten Winkeln zusammentreffende Schwingungen auch einander sich nicht aufheben können, so müssen sie doch eine bestimmte Wirkung auf einander äufsern, von denen wir uns durch Betrachtung verwandter Erscheinungen eine Anschauung bilden können. Für die Schwingungen eines elastischen Mediums finden wir aber als nächstes Analogon die Oscillationen einer Pendelkugel.

Bezeichnet von den drei auf einander folgenden Buchstaben, *a b c*, *b* die Mitte der Schwingung, *a* und *c* die Grenzen, so wird bei einer vollständigen Oscillation die Geschwindigkeit von *a* nach *b* zunehmen, bis sie in *b* am gröfsten ist, dann von *b* nach *c* abnehmen, wo sie Null wird, hier sich die Bewegung umkehren, in *b* ein zweites Maximum der Geschwindigkeit erreichen, welche wiederum bei *a* Null wird, wo die Erscheinung sich wiederholt. Denkt man sich nun der von *a* nach *c* hin- und wieder von *c* nach *a* zurückschwingenden Kugel einen auf die Ebene der Schwingung lothrechten, horizontalen Stofs ertheilt, dem gleich, welcher zuerst das Pendel aus der Lothlinie entfernte, so wird derselbe ihr die Geschwindigkeit mittheilen, welche sie bei dem jedesmaligen Durchgange durch *b* in Folge des ersten Impulses erhält. Die dadurch hervorgebrachte Bewegung

wird dann, wenn der Seitenstofs in den Stellungen *a b c b* erfolgte, durch die folgenden Pfeile angedeutet:




Wäre die Kugel bei dem zweiten Stofse nicht schon in Schwingung gewesen, sondern in Ruhe, so würde dieselbe in ganz dieselben Schwingungen versetzt worden sein, wie die sind, welche sie vorher vollführte, der Unterschied wäre nur, dafs beide Schwingungsebenen auf einander senkrecht stehen würden. Hier haben wir also einen Körper gleichzeitig angeregt zu zwei gleichen, aber auf einander senkrechten Schwingungen, also den Fall des zusammentreffenden, geradlinig auf einander polarisirten Lichtes. Stellt man den Versuch an, so wird man finden, dafs bei Ertheilung des Stofses in der Stellung *a* die Kugel in Kreisschwingungen von der Linken zur Rechten geräth. Trifft der Stofs die Kugel in *b*, so wird eine geradlinige Schwingung entstehen, deren Schwingungsebene um einen halben Rechten gegen die frühere geneigt ist, trifft er sie hingegen in *c*, so entsteht wieder eine Kreisbewegung, aber von der Rechten zur Linken. Stöfst man die Kugel aber erst bei ihrer zweiten Ankunft in *b* an, so wird eine geradlinige Schwingung entstehen und zwar in einer um einen halben Rechten links geneigten Ebene, also in einer auf jener vorher entstandenen Schwingungsebene senkrechten Richtung. Der ertheilte Stofs ist nichts anders, als der Zustand einer schwingenden Kugel in der Mitte ihrer Schwingung. Dasselbe wird also eintreten, wenn die Kugel gleichzeitig zu auf einander senkrechten Schwingungen angetrieben wird. Nennen wir die Zeit, welche verflossen ist, wenn der von *a* ausgegangene Körper wieder nach *a* zurück-

kommt, eine ganze Schwingung, so wird bei seiner ersten Ankunft in $b$ ein Viertel dieser Zeit verflossen sein, bei seiner Ankunft in $c$ die Hälfte, bei seiner zweiten Ankunft in $b$ drei Viertel. Da nun die Anregung in der zweiten Schwingung diejenige war, welche er nach einem Viertel seiner Schwingungszeit erhält, so war der Unterschied beider zusammentreffenden Schwingungen: bei dem ersten Zusammentreffen in $b = 0$, bei dem Zusammentreffen in $c = \frac{1}{4}$, bei dem zweiten Zusammentreffen in $b = \frac{1}{2}$, bei dem Zusammentreffen in $a$ endlich $= \frac{3}{4}$.

Wenden wir diese Betrachtungen nun auf unsern Fall an, so folgt unmittelbar dieses. Zwei auf einander senkrecht polarisirte Wellensysteme erzeugen bei ihrem Zusammentreffen, wenn ihr Gangunterschied Null und wenn er eine halbe Welle ist, nicht Coincidenz und Interferenz, Hell und Dunkel, sondern ein geradlinig polarisirtes Licht, dessen Polarisationsebene den Winkel zwischen jenen beiden Polarisationsebenen halbirt, und zwar, wenn dies Halbiren im ersten Falle auf der linken Seite geschieht, dann im zweiten Falle auf der rechten, und umgekehrt. Ist hingegen der Gangunterschied beider Wellensysteme ein Viertel, oder drei Viertel, so mufs Licht entstehen, welches weder die Eigenschaften des natürlichen, noch die des polarisirten hat. Es versteht sich von selbst, dafs, so wie in unserm Beispiele es vollkommen gleichgültig war, wie oft das Pendel schon geschwungen hatte, ehe es den zweiten Stofs erhielt, es eben so hier ohne Einflufs auf die Erscheinung ist, um wie viel ganze Oscillationen sich beide Wellensysteme aufserdem unterscheiden. Es braucht wohl nicht erst angeführt zu werden, dafs, wenn der zweite Stofs nicht an den Stellen $a$, $b$ und $c$ ertheilt wird, sondern zwischen $a$ und $b$, oder

zwischen *b* und *c*, statt kreisförmiger Bewegungen alle zwischen Kreis und gerade Linien fallenden Ellipsen entstehen werden. Unterscheiden sich also die zusammentreffenden polarisirten Wellensysteme um einen Theil einer Schwingung, welcher nicht grade ein Viertel ist, so wird das entstehende Licht Eigenschaften haben, welche zwischen denen des polarisirten und denen jenes vorher erwähnten liegen, mit allen verschiedenen Graden der Annäherung an das eine und an das andre.

Durch diese theoretischen Betrachtungen wurde Fresnel zu dem Schlusse geführt, dafs es aufser dem gewöhnlich oder geradlinig polarisirten Lichte noch zwei andre Arten der Polarisation geben müsse, die circulare und die elliptische. Bekanntlich wird Licht, wenn es schief aus Glas oder Wasser in Luft austreten will, unter einem gewissen Winkel ganz nach Innen reflectirt, so dafs die Trennungsfläche dann ein vollkommener Spiegel wird, den man bei optischen Instrumenten häufig unter dem Namen eines Ablesungsprisma anwendet. Aus Interferenzversuchen hatte Fresnel gefunden, dafs Licht, dessen Polarisationsebene einen Winkel von 45 Grad mit der Einfallsebene macht, nach einer solchen totalen Reflexion sich so verhielt, als bestände es aus zwei gleichen Mengen auf einander senkrecht polarisirten Lichtes, von denen die eine um ein Achtel einer Undulation hinter der andern zurückgeblieben ist. Es bedurfte also zweier solcher Reflexionen, um den Unterschied auf $\frac{1}{4}$ zu bringen, bei vieren mufste er $\frac{1}{2}$ werden, bei sechs $\frac{3}{4}$, endlich bei acht 1. Das Licht mufste also nach diesen verschiedenen Reflexionen rechts-circular sein, linear, links-circular und auf jenem linearen senkrecht linear. Die Erfahrung bestätigte, wie es sich von selbst versteht, alles,

was Fresnel vorher gesagt hatte. Ist der Winkel zwischen Einfallsebene und Polarisationsebene ein anderer als 45 Grad, so wird das Licht elliptisch.

Denkt man sich den Stab, durch welchen wir früher die Schwingungsrichtung in einem linear polarisirten Strahle bezeichneten, in einen horizontalen Kreis umgebogen, so wird man einsehen, dafs die Drehung des schiefen Brettes keinen Einflufs auf die Erscheinungen bei dem Auffallen dieses Reifens mehr haben kann. In Beziehung auf den analysirenden Spiegel verhält sich daher circulares Licht wie unpolarisirtes, d. h. es zeigt bei der Drehung desselben stets dieselbe Helligkeit. Es unterscheidet sich aber dadurch von demselben, dafs es in doppelt brechenden Körpern zu Farben Veranlassung giebt. Verbindet man bei der polarisirenden oder analysirenden Vorrichtung eines Polarisationsapparates die lineare Polarisation mit der circularen und elliptischen, so sieht man leicht, dafs die Anzahl der Combinationen sehr mannigfach ist, die sich aber in einem Apparate vereinigen lassen.

Circular polarisirtes Licht circular analysirt, zeigt um die Achse eines einachsigen Krystalles die Newton'schen Ringe, von keinem Kreuze durchschnitten. Geschieht hingegen die Analyse linear, so sieht man eine Erscheinung, von welcher man sich auf folgende Art eine Anschauung bilden kann. Durchschneidet man die reflectirten Ringe mit schwarzem Kreuz, ebenso die Ringe mit weifsem Kreuz in die vier Quadranten, in welche sie durch die Kreuze selbst zerfallen, so erhält man, wenn man den ersten und dritten Quadranten des einen Systems mit dem zweiten und vierten des andern verbindet, die Phänomene im rechts circularen Lichte, hingegen im links circularen, wenn man den zweiten

und vierten Quadranten jenes Systems in derselben Ordnung mit dem ersten und dritten dieses verbindet. Die Erscheinungen in den einander begrenzenden Quadranten sind daher bei weifsem Lichte complementar, und man sieht deswegen in homogener Beleuchtung die auffallende Erscheinung, dafs das erste Viertel jedes Ringes hell ist, das zweite schwarz, das dritte hell, das vierte schwarz, genau wie es die von Airy [1]) gegebene theoretische Untersuchung verlangt. Wie wir früher gesehen haben, sind die bei linearer Polarisation gesehenen Ringe um die Achse eines positiven Krystalles ganz übereinstimmend mit denen eines negativen. Dies ist nicht mehr der Fall bei circularem Lichte. Rechts circulares Licht entwickelt nämlich um die Achse eines positiven Krystalles dieselben Ringe, wie links circulares um die Achse eines negativen, welchen aus der Theorie folgenden Schlufs ich durch die Erfahrung bestätigt gefunden habe [2]). Das von den einachsigen Krystallen gesagte gilt in gleicher Weise von zweiachsigen. Bei circularer Polarisation und Analyse erscheinen die isochromatischen Curven an Gestalt unverändert, aber ohne durchschneidendes schwarzes Kreuz. Da, wo in einem einachsigen Krystalle die Newton'schen reflectirten Ringe mit schwarzem Mittelpunkt gesehen werden, erscheinen die beiden Mittelpunkte der Curven in zweiachsigen Krystallen aber nicht als schwarze Punkte, sondern wegen der verschiedenen Neigung der Achsen in verschiedenen Farben als kleine Spectra analog einem auf weifsem

[1]) On the nature of the light in the two rays produced by the double refraction of quartz. Cambr. Trans. 4, p. 79, 199. Pogg. Ann. 23, p. 204.

[2]) Ueber den Unterschied positiver und negativer Krystalle bei circularer und bei elliptischer Polarisation. Pogg. Ann. 40, 457.

Grunde durch ein Prisma gesehenen schwarzen Punkte. Von den Erscheinungen bei linearer Polarisation und circularer Analyse wird man sich unmittelbar eine Anschauung bilden, wenn man sich die Ringsysteme bei gekreuzten Spiegeln durch die Arme des schwarzen Kreuzes in vier Theile zerschnitten denkt, und die vier Quadranten sich eben so verschoben denkt, als wir es bei den einachsigen eben besprochen haben. Da nun rechts circulares Licht hier bei gewissen Krystallen dieselben Verschiebungen hervorruft, als links circulares in andern, so zerfallen die zweiachsigen Krystalle in gleicher Weise wie die einachsigen, in positive und negative. Auch bei den zweiachsigen Krystallen ist die Anzahl der negativen gröfser, als die der positiven; von erstern sind Arragonit und Salpeter bekannte Beispiele, hingegen gehört der brasilianische Topas zu den positiven.

Die Ableitung der Farbenringe in Krystallen beruhte auf der Bestimmung des Gangunterschiedes der durch Doppelbrechung getrennten Strahlen. Bei einem sehr dünnen Krystallblättchen kann dieser Unterschied grade $\frac{1}{4}$ werden, und darauf gründet sich das Verfahren von Airy [1]), mittelst eines Glimmerblättchens, welches zwischen beide Spiegel eingeschaltet wird, das Licht circular zu polarisiren. So wie nun hier verschiedene Dicken einen verschiedenen Gangunterschied hervorbringen, so kann man bei derselben Stärke des Blättchens durch Veränderung seiner doppelbrechenden Kraft den Gangunterschied beider Strahlen verändern. Dies habe ich durch allmähliges Erwärmen eines Glaswürfels erhalten, den ich auf diese Weise aus einem einfach brechenden Körper in einen immer stärker doppelbrechenden ver-

[1]) On a new analyser of light. Cambr. Trans. und Pogg. Ann. 26, 140.

wandelte. Man sieht dabei an den regelmäfsigen Veränderungen des Ringsystemes die lineare, elliptische und circulare Polarisation bei allmählig steigender Erwärmung durch alle Zwischenstadien in einander übergehen, und man kann sich von den diese Erscheinung bedingenden Schwingungen ein deutliches Bild verschaffen, wenn man eine in ein glänzendes Knöpfchen endende Stahlnadel in einen Schraubstock einspannt und durch zwei Stöfse zu elliptischen Schwingungen bestimmt. Gehen diese durch die gerade Linie hindurch, so kehrt sich auch hier der Sinn der Schwingung sogleich um.

Da eine Platte von bestimmter Dicke für verschiedene Wellenlängen nicht denselben Gangunterschied hervorbringen kann, so folgt, dafs, wenn derselbe bei einem dicken Glimmerblättchen für das eine Ende des Spectrums eine ganze Anzahl Undulationen ist, er nach der andern Grenze des Spectrums hin diese Anzahl um $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, 1 übertreffen wird. Dies führt zu dem Schlusse, dafs, wenn man das Spectrum über die polarisirende Vorrichtung hinwegführt, das vom schwarzen Kreuze durchschnittene Ringsystem der einen Farbe sich in der andern in die scharf abgesetzten Bogen des circularen Lichtes öffnen mufs, darauf in ein Ringsystem mit hellem Kreuz übergehen wird, bis es nach dem Durchgange durch die nach entgegengesetzter Richtung abgebrochenen Bogen wieder zu der ersten Form zurückkehrt. Alle bisher unmittelbar bemerkten Unterschiede der einzelnen Farben sind, die Ringsysteme des Glauberit etwa ausgenommen, nur quantitativ (ungleiche Weite der Ringe bei Interferenzphänomenen, ungleiche Brechung durch dasselbe Prisma, ungleiche Ablenkung bei Beugungsphänomenen, verschiedene Neigung der Farbenachsen, ungleiche

Drehung der Polarisationsebene im Bergkrystalle) hier müssen wir aber ganz unähnliche Zeichnungen erwarten, so wie die Farbe der Beleuchtung sich ändert. Die von mir angestellten Versuche bestätigen aber auch hier vollkommen das, was die theoretische Betrachtung hatte vorher sehen lassen [1]). Das Uebereinandergreifen dieser so verschieden gestalteten Ringsysteme bei weifser Beleuchtung giebt natürlich einen Reichthum von Farbenabwechselungen, den man sonst nur in zweiachsigen Krystallen zu sehen gewohnt ist, der sich aber, durch ein homogenes Glas betrachtet, ganz auf das im Spectrum vorher Wahrgenommene wieder zurückführen läfst. Um bei solchen Phänomenen an der wahren, einfachen Natur des Weifsen nicht irre zu werden, mufs man sich nur immer den schlagenden Gegenbeweis lebhaft vergegenwärtigen, »dafs hundert graue Pferde nicht einen einzigen Schimmel machen« [2]).

Eine auf die Achse senkrecht geschnittene Bergkrystallplatte zeigt ein ganz andres Ringsystem als alle andern einachsigen Krystalle. Die Ringe sind nur von einem grauen Kreuze durchschnitten, dessen Arme nicht bis zur Mitte reichen. Diese Mitte bildet ein farbiger Fleck. Dreht man die analysirende Vorrichtung, so verengern sich in einem rechts gewundenen Bergkrystalle die Ringe bei derjenigen Drehung, bei welcher sie sich bei einem links gewundenen erweitern. In circularem Lichte erscheinen die Farbencurven als Spiralen, in jenen nämlich rechts gewunden, in diesen links gewunden. Die Drehung der Polarisationsebene ist verschieden für die einzelnen Farben, daher ändert im weifsen Lichte

[1]) Versuche über die Circularpolarisation des Lichtes. Pogg. Ann. 35, p. 579.

[2]) Goethes Werke 50, p. 190.

die Mitte stets dem entsprechend ihre Farbe. In einer ein Millimeter dicken Platte beträgt diese Drehung nach den Messungen von Biot:

| | |
|---|---|
| im äufsersten Roth | 17° 4964 |
| an der Grenze zwischen Roth und Orange | 20° 4798 |
| » » » » Orange und Gelb | 22° 3138 |
| » » » » Gelb und Grün | 25° 6752 |
| » » » » Grün und Blau | 30° 0460 |
| » » » » Blau und Indigo | 34° 5717 |
| » » » » Indigo und Violett | 37° 6829 |
| im äufsersten Violett | 44° 0827 |

und zwar ist sie in einer Platte eines rechts gewundenen Bergkrystalls genau so grofs nach Rechts, als in einer gleich dicken Platte eines links gewundenen Individuums nach Links. Für die festen Linien B, C, D, E, F, G, findet Broch (Repertorium der Physik 7, p. 115) folgende Werthe für eine ein Millimeter dicke Platte:

| | |
|---|---|
| B | 15° 30 |
| C | 17° 24 |
| D | 21° 67 |
| E | 27° 46 |
| F | 32° 50 |
| G | 42° 20 |

Unter den aus der Verschiedenheit des Drehungswinkels für die verschiedenen Farben bei weifser Beleuchtung resultirenden Farben giebt es eine sehr charakteristische violette, welche den Uebergang vom reinen Blau zum Roth und Orange bildet, deren Rotationswinkel daher leicht bestimmt werden kann. Biot nennt sie *teinte de passage*. Alle im Bergkrystall sich zeigenden Erscheinungen sind von Airy [1]) unter der

[1]) On the nature of the light in the two rays produced by the double refraction of quartz. Cambr. Trans. 4, p. 79, 199. Pogg. Ann. 23, p. 204.

Voraussetzung abgeleitet worden, dafs, wenn Licht senkrecht auf die Achse des Krystalls eintritt, die lineare Polarisation desselben sich durch alle Uebergänge der elliptischen Polarisation in schiefern Richtungen, zuletzt in der Richtung der Achse in circulare verwandle, und wirklich hat Fresnel [1]) durch Combinationen von Bergkrystallstücken, deren Achsen gleich gerichtet waren, Bilder erhalten, welche rechts und links circular polarisirt sind. Einen bedeutenden Aufschlufs über die Natur besonders öliger Flüssigkeiten kann man endlich dadurch hoffen, dafs viele derselben, nach Biot's und Seebeck's Entdeckung [2]), ähnliche Drehungskräfte zeigen, wie der Bergkrystall, so dafs die Erscheinungen dieser Polarisation in der Zuckerfabrikation eine unmittelbar practische Anwendung gefunden haben [3]). So wie wir aber unkrystallinische Körper, wie Glas, durch Pressung, schnelle Abkühlung und tönende Schwingungen in doppelbrechende verwandeln, so ist es neuerdings Faraday [4]) gelungen, Körpern, welche unmittelbar die Polarisationsebene nicht zu drehen vermögen, in drehende zu verwandeln. Wasser, von einem electrischen Strome in einer rechts gewundenen Spirale umflossen, verhält sich wie eine rechts

[1]) Extrait d'un mémoire sur la double réfraction particulière que présente le cristal de roche dans la direction de son axe. Ann. de Chim. et de Phys. 28, p. 247. Pogg. Ann. 21, p. 276.

[2]) Mémoire sur les rotations que certaines substances inpriment aux axes de polarisation des rayons lumineux. Mém. de l'Inst. de l'Acad. 1818. p. 41.

[3]) Sur un caractère optique à l'aide duquel on reconnait immédiatement les sucs végétaux, qui peuvent donner du sucre analogue au sucre des cannes, et ceux qui ne peuvent donner que du sucre semblable au sucre du raisin. Ann. de Chim. et de Phys. 52, p. 58. Pogg. Ann. 28, p. 165.

[4]) Experimental researches in electricity, 19 series.

drehende Flüssigkeit, von einem links gewundenen umschlossen, wie eine links drehende.

Geradlinig polarisirtes Licht endlich wird von Metallen stets, wie Brewster [1]) bewiesen hat, als elliptisch polarisirtes Licht zurückgeworfen, directes ist nie nach einmaliger Reflexion durch dieselben geradlinig polarisirt, sondern nur annäherungsweise durch wiederholte Reflexionen. Hier erhalten wir also unmittelbar durch die Reflexion einen Gangunterschied, wie wir ihn früher durch Einschalten eines dünnen Glimmerblättchens erhielten, und es wird daher der Grund einleuchten, warum das von Metallen reflectirte Licht bei seiner Analyse durch eine geradlinig polarisirende Vorrichtung, hier unmittelbar ohne Einschaltung eines Krystallblättchens, zu Farben Veranlassung giebt, warum endlich im weifsen Lichte diese Farbenerscheinungen sehr stark mit der Zahl der Reflexionen, sowohl was die Tiefe der Farben, als was die Schnelligkeit ihres Wechsels betrifft, sich verändern. Aehnliche Phänomene, wie bei der Reflexion durch Metalle, entstehen bei der Reflexion und Brechung durch stark lichtbrechende Substanzen, z. B. durch den Diamanten, und so wird das, was das Auge ahnungsvoll als ein sich Unterscheidendes durch die Namen: metallischer Glanz, Glasglanz etc. bezeichnet, immer näher auf seine physikalischen Gründe zurückgeführt.

Haben die bisherigen Betrachtungen gezeigt, dafs die Wellentheorie nicht nur von sämmtlichen Erscheinungen der Interferenz und Polarisation eine vollständige Rechenschaft giebt, sondern dafs ihre Ergebnisse auch in genauem Ein-

[1]) On the phenomena and laws of elliptic polarization as exhibited in the action of metals upon light. Ph. Tr. 1830. p. 28. Pogg. Ann. 21, p. 219.

klange stehen mit dem, was Thermik, Akustik und Krystallographie auf ganz von optischen Untersuchungen unabhängigen Wegen gefunden, so bleibt die Frage noch zu beantworten, ob sie auch den prismatischen, den Absorptions- und physiologischen Farben gegenüber sich bewährt.

Bekanntlich ist es Newton, welcher durch eine Reihe entscheidender Versuche zuerst nachwies, dafs Licht von verschiedener Wellenlänge durch dieselbe brechende Substanz ungleich abgelenkt wird. So nämlich mufs der Satz: *lumina, quae colore differunt, ea itidem refrangibilitatis gradibus inter se differunt,* ausgesprochen werden, um die Zweideutigkeit des Wortes *color* zu beseitigen, welches die Meinung veranlafst, es könne darunter eine Farbe verstanden werden, welche bei der rohsten Untersuchung sich schon als zusammengesetzt erweist.

Ist ein durchsichtiger Körper durch parallele Flächen begrenzt, entweder durch ebene, wie bei einer Planscheibe, oder durch gekrümmte, wie bei einem Uhrglase, so ist die Richtung und Farbe des Lichtes nach seinem Austritte unverändert. Sind hingegen die Begrenzungsflächen an den Punkten, an welchen das Licht eintritt, und an welchen es austritt, gegen einander geneigt, so ist auch der austretende Strahl geneigt gegen den eintretenden, und entweder gleich, oder anders gefärbt, als der eintretende. Sind jene geneigten Flächen eben, so heifst der Körper ein Prisma, sind sie hingegen gekrümmt, eine Linse. Da aber die Erscheinungen der Brechung durch das Einfallsloth bestimmt werden, so kann man immer statt der gekrümmten Flächen die Berührungsebenen an jenen Punkten substituiren, woraus hervorgeht, dafs die durch Linsen entstehenden Farben eine Unterabtheilung der prismatischen sind.

Um die Richtungsverschiedenheit des aus dem Prisma austretenden Lichtes und des auf dasselbe einfallenden am übersichtlichsten zu machen, wollen wir Sonnen- oder Tageslicht betrachten, welches durch eine beliebig begrenzte Oeffnung willkürlicher Weite scheinend, auf einer beliebig geneigten Tafel aufgefangen, stets eine senkrechte Projection dieser Oeffnung darstellt. Das nach seinem Austritt aus dem Prisma aufgefangene Licht kann nun entweder auch senkrechte, oder perspectivische Projectionen darstellen. Im ersten Falle bleibt der durch eine runde Oeffnung einfallende Lichtcylinder ein Cylinder, im zweiten Falle öffnet er sich in einen Kegel. Im ersten Falle ist also nur die Rede von der Richtungsverschiedenheit der Achsen zweier Cylinder, und diese nennt man Brechung, im zweiten, aufser von der Richtungsverschiedenheit der Cylinder- und Kegelachse, d. h. aufser von der Brechung, noch von dem Winkel an der Spitze dieses Kegels: der Zerstreuung oder Dispersion. Jedesmal, wenn das Licht sich kegelförmig öffnet, ist die Farbe des austretenden verschieden von der des einfallenden, es mufs also die Formänderung des projicirten Bildes zusammenhangen mit der Färbung desselben. Um aber die Vergleichung des austretenden Lichtes mit dem eintretenden nicht durch unnöthige Unterschiede zu compliciren, mufs die Achse des austretenden Lichtkegels so gegen die Austrittsfläche des Prisma geneigt sein, als die Achse des einfallenden Lichtcylinders gegen die Eintrittsfläche. Diese Stellung des Prisma hat daher Newton stets gewählt. Was von den objectiven Versuchen gesagt wird, gilt auch von den subjectiven, in welchen das Auge die auffangende Tafel darstellt.

Hängt nun die Brechung des Lichtes von seiner Wellen-

länge ab, so wird ein Cylinder einfallenden, monochromatischen Lichtes zu einem Cylinder gebrochenen, monochromatischen Lichtes Veranlassung geben, ein Cylinder des einfallenden, dichromatischen Lichtes nach der Brechung in zwei gegen einander geneigte Cylinder monochromatischen Lichtes zerfallen u. s. f. Fällt also Licht ein, dessen Wellenlänge innerhalb zweier Grenzen alle Mittelwerthe der Wellenlänge enthält, so werden die entstehenden Cylinder in ihren Neigungen allmählig in einander übergehen. Verhält sich nun hier, wie bei sämmtlichen Interferenzphänomenen, zusammenfallendes monochromatisches Licht aller Wellenlängen wie weifses, so wird, wenn die auffangende Fläche viele Cylinder durchschneidet, gemischte Farbe ja sogar weifs erscheinen, und es ist daher unmittelbar klar, wie mit Vergröfserung der Oeffnung jenes Ineinandergreifen der verschiedenen Cylinder immer stärker wird, wie mit der Entfernung vom Prisma dieses Ineinandergreifen bei gleichbleibender Weite sich vermindern mufs. Die Freude über das Weifs des prismatischen Sonnenbildes bei grofser Oeffnung [1]) oder nahe am Prisma ist also nichts anders, als das Vergnügen darüber, die Gründe auch eingesehen zu haben, warum Newton die Oeffnung klein gewählt hat, warum er das Spectrum in einer bestimmten Entfernung aufgefangen, warum endlich alles, was von homogenem Lichte gesagt wird, nicht eintritt, wenn jene Bedingungen unabsichtlich oder absichtlich nicht erfüllt werden [2]).

[1]) Separatio in marginibus imaginis perfecta est, verum in omni parte imaginis inter ista latera lumen satis compositum est, quod si jam circulorum illorum diametri, centrorum situ atque intervallis nihil mutatis, diminui, possent, utique permixtio ipsorum inter se consimili proportione diminuerentur.

[2]) Qui ergo rem hoc modo consideraverit, is facile intelliget,

Newton's Beweise der ungleichen Brechbarkeit der verschiedenen Farben beruhen darauf, dafs er nachweist: 1) dafs sie neben einander vor der Brechung stehend nach ihr nicht mehr neben einander sich befinden, 2) dafs sie nach einander vor der Brechung an derselben Stelle sich befindend, nach der Brechung nach einander an verschiedenen erscheinen, 3) dafs sie gleichzeitig an derselben Stelle vorhanden nach der Brechung in der Brechungsebene unter einander liegen, endlich 4) dafs sie von derselben Linse, unter gleichem Einfallswinkel gebrochen, in verschiedenen Entfernungen sich vereinen.

Was nun die prismatischen Farben betrifft, so hat Goethe selbst die von Newton gefundenen Resultate nie geleugnet, wenn aber eine Widerlegung durch Pigmente geschehen soll, so mufs wenigstens die Absicht vorhanden sein, nicht so gemischte zu wählen, wie der blaue und rothe Fleck auf der dritten Figurentafel der Farbenlehre. Die Entdeckung, dafs es gemischte Farben gebe, kommt 100 Jahre zu spät, um auf Priorität Anspruch zu machen. Sie ist eben so wenig neu, wie die des auf der gedrehten Farbenscheibe entstehenden »niederträchtigen Grau,« da Lambert schon 1772 gezeigt hat, wie man aus Roth, Blau und Gelb sogar Schwarz machen könne. Dafs aber die reineren Farben farbiger Gläser und monochromatischer Flammen genau sich verhalten wie die prismatischen Farben, wird wohl Niemand leugnen, der sich durch Versuche selbst überzeugen will. Was endlich den Einwurf betrifft, dafs man sich im Kreise bewege, wenn man die Entstehung der prismatischen Farben zurückführe auf die Erscheinungen, welche bereits durch

radiorum permixtionem eadem proportione diminui, ac diametros circulorum. Optice lib. I, prop. 4, probl. 1.

ein Prisma erzeugte Farben nach ihrem Durchgange durch ein zweites Prisma entwickeln, so ist dieser dadurch beseitigt, dafs man, wie Frauenhofer gezeigt hat, auf ganz anderm Wege, nämlich durch dioptrische und Reflexionsgitter, also ganz ohne Brechung, dasselbe Spectrum erhält, welches nun, prismatisch untersucht, genau zu denselben Ergebnissen führt. Von kleinen Oeffnungen, von der übersehenen Wirkung der Ränder noch zu sprechen, würde jetzt wenigstens vollkommen lächerlich sein, seitdem wiederum Frauenhofer nachgewiesen hat, dafs das Spectrum des unter freiem Himmel betrachteten Abendsternes ganz dieselben Eigenschaften hat, wie das in einer Spalte aus Sonnenlicht erzeugte. Betrachtet man alle diese auf so verschiedenen Wegen erhaltenen Spectra subjectiv durch ein achromatisches Fernrohr, so sieht man sie durchzogen von einer grofsen Anzahl heller und dunkler, innerhalb des ganzen Farbenraumes unregelmäfsig vertheilter Linien. Wendet man hingegen ein minder vollkommenes, oder ein nicht achromatisches Fernrohr an, so sieht man diese Linien stets nur in einer Farbe des Spectrums. Da man nun einen Gegenstand nur dann deutlich sieht, wenn das durch das Objectiv entstandene Bild in den Brennpunkt des Oculars fällt, so ist dadurch, dafs man das Ocular verschieben mufs, wenn man in einer andern Farbe die Linien sehen will, streng erwiesen, dafs dieselbe Linse verschiedenfarbiges Licht in verschiedenen Entfernungen vereinigt, d. h. es verschieden durch Brechung ablenkt. Marat, damals, als er seine Untersuchungen über das Licht schrieb, noch nicht so Terrorist wie später, wo er wünschte, dafs Newton's Bücher verbrannt werden möchten, nennt das Resultat dieses Versuches, wenn es zu Gunsten Newton's ausfiele, entschei-

dend. In Newton's Versuche war, da er die dunkeln Linien nicht kannte, der das Bild hervorbringende Gegenstand eine vom Spectrum beleuchtete Druckschrift. Das Verschwinden derselben in blauer Beleuchtung, wenn sie im Roth sichtbar ist, erklärt Goethe durch die gröfsere Dunkelheit der blauen Beleuchtung. Da er aber sagt, dafs er das Frauenhofer'sche Kunststück auch machen könne, so hat er sich selbst überzeugen können, dafs die im Blau sichtbaren Linien im Roth verschwinden, wenn das Ocular auf die ersten eingestellt war. Wenn also Newton ein Vorwurf treffen soll, so ist es der, dafs er mit einem unvollkommenen Apparate das Rechte gefunden, während Goethe an die Stelle eines richtig gedeuteten Phänomens eine nachweisbar falsche Erklärung stellt. Der unter dem Namen *experimentum crucis* bekannte fünfte Newton'sche Versuch, in welchem ein horizontales Spectrum durch ein horizontal gehaltenes Prisma betrachtet, oder objectiv dargestellt, sich diagonal verzieht, ist übrigens schon so entscheidend, dafs dieses Resultat nicht dadurch verdeckt wird, dafs es bei Goethe heifst, das Spectrum erscheine völlig wie vorher, nur etwas vorwärts gebogen, denn die Veränderung ist genau gleich der ursprünglichen Veränderung in der auf dieser senkrechten Dimension. Wenn weiterhin ansdrücklich eingeschärft wird, man müsse hiebei Prismen von wenigen Graden anwenden, bei welchen natürlich die Ablenkung nicht bedeutend sein kann, so wird man auch den Schlufs jenes 101. Paragraphen ohne weitern Commentar verstehen: »und auf diese Weise vorbereitet, wird man sich überzeugen, dafs Newton's Proposition keinesweges durch dieses Experiment irgend ein Gewicht erhalten habe« [1]). Wem es

[1]) Bei der Darstellung dieses Versuches, den eben Newton als

aber darum zu thun ist, unvorbereitet diese Proposition zu prüfen, der halte ein durch Kobalt gefärbtes, tief violettes Glas vor ein gewöhnliches Wachslicht, und betrachte diese violette Flamme durch ein gleichseitiges Flintglasprisma. Er kann dann selbst entscheiden, ob er das Blau durch einen breiten, dunkeln Raum von dem Roth getrennt sieht, oder nicht. Hier ist kein Rand, kein Farbengespenst (denn so soll ja nun einmal Spectrum übersetzt werden), vor dem man sich zu fürchten braucht, auch keine kleine Oeffnung [1]).

entscheidend *experimentum crucis* nannte, Tafel II *g*, ist aufserdem, wie Goethe selbst eingesteht, die Zeichnung noch falsch; pag. 6 der Erklärung der Tafeln heifst es: »Nur ist hier in der Tafel der Fehler, dafs das erscheinende Bild *g* nicht weit genug weggerückt, und nicht breit genug gefärbt ist. Welches man sich denken, oder auf einem besondern Blatt leicht verbessern kann«.

[1]) Da so viel gegen kleine Oeffnungen polemisirt worden ist, so ist durch eine falsche Zeichnung auf der ersten Farbentafel Goethe's der Verdacht entstanden, es seien deswegen von ihm grofse gewählt, weil man da nicht so deutlich wahrnehmen könne, dafs das Spectrum unmöglich durch ein Doppelbild hervorgebracht werden kann. Ein verdoppelter Kreis wird nämlich immer zwei Kreise mit zwei Einschnitten geben. Der Umfang jedes durch eine runde Oeffnung gebildeten prismatischen Farbenbildes von jeder beliebigen Gröfse besteht aber aus zwei Kreisbogen und aus ihren gemeinschaftlichen geraden Tangenten. Da nun für ein gegebenes Prisma der Abstand der beiden Mittelpunkte ein gegebener ist, so werden die Tangenten bei Vergröfserung der Oeffnung immer weniger merklich. Dieser Verdacht gegen Goethe ist aber ungerecht. Ich führe dies daher blos deswegen an, weil viele, welche sich Anhänger der Goetheschen Farbenlehre nennen, die Unkenntnifs derselben und die der Erscheinungen so weit treiben, dafs sie glauben, es sei hier von einer Verdoppelung die Rede, im Sinne eines Nebeneinanderlegens von zwei Bildern. Dafs dies nicht Goethe's Ansicht ist, geht aus der richtigen Zeichnung des in der Diagonale verschobenen Quadrates hervor, während bei den verdoppelten Kreisen allerdings die Tangenten nicht sichtbar sind, also das Phänomen falsch dargestellt ist. Hegel sagt

Was also die Goethe'sche Ableitung der prismatischen Farben betrifft, so ist sie kurz folgende. Dunkele Gegenstände, durch ein erleuchtetes Trübes gesehen, erscheinen blau, z. B. die Berge und der Himmel durch die reine Luft betrachtet, helle hingegen, durch ein Trübes gesehen, gelb,

in dieser Beziehung viel bestimmter: »dafs beim Prisma das Helle über das Dunkele, oder umgekehrt, hergezogen wird, so dafs das Helle eben so noch als Helles selbstständig durchwirkt, als es getrübt an seiner Stelle bleibt und zugleich verrückt wird.« Die bei Newton ruhend neben einander vorgestellten, unzähligen Bilder sind also hier dargestellt als Stadien der Bewegung eines Bildes. Um aber in die Goethe'sche Darstellung nicht etwas hineinzulegen, was sie vielleicht nicht unmittelbar enthält, führe ich Goethe's Worte selbst an: »In dem gegenwärtigen Falle, da wir von Farbenerscheinungen bei Gelegenheit der Refraction sprechen, kommt nur das begrenzt Gesehene, kommt nur das Bild in Betrachtung, denn das unbegrenzt durch Refraction Gesehene zeigt keine Farbenerscheinungen. Wir können aber die Bilder überhaupt zu nähern chromatischen Darstellungen in primäre und secundäre Bilder eintheilen, nämlich 1. ursprüngliche und abgelenkte, 2. directe und indirecte, 3. Hauptbilder und Nebenbilder. Ein Nebenbild ist eine Art von Doppelbild, nur dafs es sich von dem Hauptbilde nicht trennen läfst, ob es sich gleich immer von demselben zu entfernen strebt. Von solchen ist nun bei den prismatischen Erscheinungen die Rede. Das Bild wird durch Refraction verrückt, aber nicht vollkommen, nicht rein, nicht scharf verrückt, sondern unvollkommen, dergestalt, dafs ein Nebenbild entsteht. Es entsteht, wenn die Refraction auf ein Bild wirkt, an dem Hauptbilde ein Nebenbild, und zwar scheint es, dafs das wahre Bild einigermafsen zurückbleibe und sich dem Verrücken gleichsam widersetze. Das Kennzeichen des Nebenbildes ist die Halbdurchsichtigkeit. Man denke sich daher innerhalb eines durchsichtigen Mittels, dessen innere Anlage ist, nur halbdurchsichtig, nur durchscheinend zu werden (das Durchsichtige selbst, empirisch betrachtet, ist schon der erste Grad des Trüben), man denke sich innerhalb desselben ein halbdurchsichtiges Scheinbild, so wird man dieses sogleich für ein trübes Bild ansprechen. Und so lassen sich die Farben bei Gelegenheit der Refraction aus

wie die Sonne durch einen gewissen Grad Dünste gesehen. Das Prisma erzeugt aber so vor einander schwebende Bilder, die halb übereinandergreifend, auf der einen Seite den gelben, auf der andern den blauen Rand hervorbringen. Hier nun wird jeder Unbefangene zugeben, dafs in der Goethe'schen Vorstellung immer nur zwei Farben entstehen können, nicht drei [1]). Denn was heifst das, im Sinne der Theorie, das

der Lehre von den trüben Mitteln gar bequem ableiten. Denn wo der voreilende Saum des trüben Nebenbildes sich vom Dunklen über das Helle zieht, erscheint das Gelbe, umgekehrt wo eine helle Grenze über die dunkle Umgebung hinaustritt, erscheint das Blaue. Die voreilende Farbe ist immer die breitere (§. 230 — §. 240). Ob nun diese Darstellung die sei, in welcher allein die Begriffsbestimmung der Farbe auf die ihr gehörige sinnliche Weise ausgedrückt wird, ist eine Frage, deren Beantwortung, der Wellentheorie gegenüber, bis jetzt wenigstens noch nicht einmal versucht worden ist.

[1]) §. 801 sagt Goethe: »Gelb und Blau, welche wir als die ersten und einfachsten Farben ansehen.... §. 802: Wenn beide Mutterfarben sich in der Mischung (zu Grün) genau das Gleichgewicht halten, so ruht das Auge und das Gemüth auf diesem Gemischten wie auf einem Einfachen.... §. 792: Man denke sich ein ganz reines Roth, einen vollkommen auf einer weifsen Porzellanschale aufgetrockneten Carmin. Wir haben diese Farbe ihrer hohen Würde wegen manchmal Purpur genannt. Wer die prismatische Entstehung des Purpurs kennt, der wird nicht paradox finden, wenn wir behaupten, dafs diese Farbe theils *actu*, theils *potentia* alle andern Farben enthalte. Hingegen heifst es aber §. 819: Gelb und Blau ist die einfachste von solchen Zusammenstellungen. Man kann sagen, es sei zu wenig in ihr, denn da ihr jede Spur von Roth fehlt, so geht ihr zu viel von der Totalität ab.« Von Hooke endlich sagt Goethe in der Geschichte der Farbenlehre: »Seine Farbenlehre ist freilich barok: Er nimmt nur zwei Farben an, Blau und Roth.« Endlich §. 50: »Gelb fordert Violett, Orange das Blau, Purpur das Grüne. So fordert die einfachere Farbe die zusammengesetztere.« Hier ist also Purpur, welcher theils *actu* theils *potentia* alle andern Farben enthält, einfacher gegen das zusammengesetztere Grün, auf welchem das Auge und das Gemüth wie auf einem Einfachen ruht.

Gelb steigert sich allmählig zum Roth? Merkwürdiger Weise sagt auch Goethe (696) »die Farbe stellt einen Gegensatz dar, den wir eine Polarität nennen, und durch Plus oder Minus recht gut bezeichnen;« und nun folgen solche Gegensätze: Gelb und Blau, Licht und Schatten, Hell und Dunkel, Abstofsen und Anziehen, wo man denn billiger Weise nach dem Rothen fragt. Denn wenn sich das Gelb zu dem Roth steigert, warum steigert sich dann das Blau nicht auch. Hegel nennt Grün die Vermischung des Gegensatzes des Blauen und Gelben; Roth die Individualität desselben. Eine Schwierigkeit auf diese Weise beseitigen, heifst sie anerkennen. Denn dafs deswegen, weil Roth die geforderte Farbe des Grünen ist, jenes als subjective Einheit des Blauen und Gelben dem Grünen als blos äufserlicher Zusammensetzung derselben gegenüber treten müsse, würde bei dem ganz gleichen Verhalten des Violetten zum Gelben und des Orange zum Blauen doch wohl nicht als ein Grund angegeben werden können. Man hat der Newton'schen Farbentheorie vorgeworfen, dafs sie nicht bestimmt angebe, wie viel Farben es gebe. Von der Goethe'schen kann man aber sagen, dafs sie nicht zu der Anzahl führt, die sie als die richtige voraussetzt.

Nach dem Gesetze der Reciprocität bleibt jede optische Erscheinung dieselbe, wenn man sich vorstellt, das Licht gehe den entgegengesetzten Weg. Fängt man daher in beliebiger Entfernung vom Prisma den aus ihm austretenden farbigen Lichtkegel mit einem dem ersten gleichen, aber nicht gleichartig, sondern symmetrisch gestellten Prisma auf, so wird das aus diesem zweiten Prisma austretende Licht ein gerader Cylinder weifsen Lichtes werden, dessen Achse der Achse des auf das erste Prisma einfallenden Cylinders pa-

rallel ist. Könnte man durch ein Prisma von stärker brechender Substanz und kleinerem Winkel ein dem ersten ganz entsprechendes Spectrum hervorbringen, so würde vollkommene Achromasie ohne Aufhebung der Brechung möglich sein. Dies ist aber, wie die secundären Spectra, welche dann hervortreten, zeigen, nicht möglich, und in diesem Sinne hatte Newton vollkommen Recht, dafs diese Achromasie, streng genommen, nicht möglich ist. Geirrt hat er sich aber, und zwar bedeutend, dafs er sie auch nicht für nahe erreichbar hielt. Die Behauptung aber, dafs Newton, welcher auf vier verschiedene Arten [1]) Achromasie darstellte, nach seiner Theorie sie für unmöglich erklärt, setzt Gläubige voraus, wie sie wenigstens in der Sphäre des Naturstudiums nicht vorausgesetzt werden dürfen.

Aber wie stellen wir uns vor, dafs divergirendes farbiges Licht, wieder parallel gemacht, weifs werde? »Kann man sich wirklich nicht stark genug über die Barbarei der Vorstellung ausdrücken, dafs auch beim Licht nach der schlechtesten Reflexionsform, der Zusammensetzung, gegriffen worden ist?« [2]).

Werden auf einer Wasserfläche von vielen Erschütte-

[1]) Aufser den angegebenen nämlich: das Zusammenfallen der äufsern Farbenringe bei auf einander gelegten Gläsern, die Vereinigung des prismatischen farbigen Lichtkegels zu Weifs in dem Brennpunkt einer Linse, endlich das Erscheinen von Weifs an der Stelle vieler paralleler Spectra, wenn die sie hervorbringenden Oeffnungen schnell bewegt werden. Statt der mit Pigmenten bemalten, rotirenden Farbenscheibe hat Münchow das Prisma selbst oscilliren lassen. Man sieht dann statt des berühmten Grau ein wirkliches Weifs. In Beziehung auf die Darstellung des Weifs aus den complementaren Polarisationsfarben siehe die spätere Abhandlung über die Erscheinungen in rotirenden Polarisationsapparaten.

[2]) Hegel, Encyclopädie p. 305.

rungspunkten aus Wellensysteme erregt, so zeigen dieselben, nachdem sie sich durchkreuzt haben, dieselbe Regelmäfsigkeit, als wäre jedes allein erregt worden. Wie viel Töne auch in einem vollstimmigen Concerte gleichzeitig erklingen, keiner verwirrt den andern. Diese *superposition de petits mouvements,* wie man sie nennt, hat man sich nicht so vorzustellen, als wenn das Lufttheilchen wirklich zugleich alle die einzelnen Schwingungen vollständig ausführte, deren regelmäfsige Wiederholung in der nicht anderweitig erschütterten Luft jeden einzelnen Ton hervorbringt. Es folgt vielmehr der Gesammtwirkung aller es gleichzeitig anregenden Impulse in einer durch sie bestimmten mittleren Richtung. Wollen wir uns aber seine Bewegung anschaulich machen, so müssen wir sie in diese verschiedenen periodischen Schwingungen zerlegen. Wenn wir also sagen, das Weifs bestehe aus den homogenen Farben, so ist damit nur gesagt, dafs die jedesmalige Bewegung des Aethers in Schwingungen mit einer jenen Farben entsprechenden Periodicität zerlegt werden könne. Ganz etwas ähnliches spreche ich aus, wenn ich sage, die Planeten bewegen sich in Ellipsen um die Sonne. Diefs ist nur wahr, abgesehen von den Störungen, d. h. unter der Voraussetzung, dafs jedesmal nur ein Planet um die Sonne sich bewegend gedacht wird. Kein Mensch hat aber bisher an diesem Ausdruck Anstofs gefunden. Weifses Licht unterscheidet sich daher von homogenfarbigem nur durch eine complicirtere Periodicität seiner Schwingungen, die aber, weil sie aus continuirlich in einander übergehenden Elementen besteht, in sich selbst ein einfacheres Gesetz darstellen kann, als das der Schwingungen nicht homogener Farben, deren Spectra sich stets als discontinuirlich, wenigstens in Beziehung auf Intensität, erwei-

sen [1]). In diesem Sinne könnte man also sagen, weifses Licht sei einfacher, als die gewöhnlichen Farben, hingegen werden immer die homogenen Farben einfacher sein, als das Weifs.

Dafs die prismatischen Farben dunkler sind, als das Weifs, folgt einfach daraus, dafs dieselbe Lichtmenge kegelförmig sich erweiternd sich über immer gröfsere Flächen verbreitet, also an Helligkeit abnimmt. Nennt man aber die Farben eine Verdunkelung des Lichtes, so ist das schon eine *petitio principii*. Ein erwärmter Draht kommt zuerst in das Rothglühen, dann erst glüht er weifs. Hier ein Trübes annehmen, durch welches das weifse Licht allmählig hindurchleuchte, wäre doch zu willkürlich. Ist es nicht viel natürlicher, darin einen Effect anzuerkennen, der sich allmählig zur Totalität steigert. Wenn es aber widersinnig sein soll, anzunehmen, dafs das Licht aus Farben, d. h. aus Dunkelheiten, bestehe, so liegt das Barocke doch wohl nur im Ausdrucke, der auf ein quantitatives Verhältnifs gar nicht pafst. Wenn jemand einen Groschen besitzt, so wird man ihn mit Recht arm nennen. Da aber das Vermögen eines Millionärs doch zuletzt aus einzelnen Groschen besteht, so könnte man eben so sagen, der Reichthum jenes Mannes ist aus lauter Armuth zusammengesetzt.

Wie hängt aber die Brechung mit der Wellenlänge zusammen? Um dies zu erläutern, müssen wir zu einem scheinbar sehr fernliegenden Gleichnifs unsere Zuflucht nehmen.

[1]) Die vollständigsten Versuche hierüber haben angestellt: Herschel, on de absorption of light by coloured media and on the colours of the prismatic spectrum exhibited by certain flames. Edinb. Phil. Trans. 9, pag. 445, und Brewster, description of a monochromatic lamp for microscopical purposes with remarks on the absorption of the prismatic rays by coloured media ib. p. 433.

Wenn ein Reiterregiment, in einer Colonne auf ebenem Boden trabend, plötzlich auf ein beackertes Feld kommt, auf welchem die Pferde nur Schritt gehen können, so wird es, wenn es schief gegen die Grenze des Feldes anreitet, unmerklich schwenken. Der zuerst auf das Feld gelangende Flügel wird nämlich schon Schritt reiten, wenn die Andern noch auf dem ebenen Felde traben. Sind aber Alle auf dem beackerten Felde angelangt, so ändert sich die Richtung nicht weiter, nur bleibt das langsamere Fortrücken. Geschah das Heranreiten aber senkrecht auf die Grenze beider Felder, so wird die Richtung unverändert bleiben, aber das Regiment so fortrücken, als wenn plötzlich Schritt commandirt worden wäre. Stellt nun jenes Reiterregiment eine Lichtwelle vor, das beackerte Feld ein dichteres Medium, z. B. Glas in Beziehung auf Luft, so wird die Richtung eines Schritt reitenden Reiters den gebrochenen Strahl bezeichnen, die Richtung eines trabenden hingegen den einfallenden. Bei senkrechter Incidenz findet also keine Brechung statt, die Schwenkung wächst mit der Neigung und im Verhältnisse des Unterschiedes des Widerstandes, welchen beide Felder dem Fortrücken entgegenstellen. Das aus der Veränderung der Richtung des gebrochenen Strahls für verschiedene Einfallswinkel stets auf dieselbe Weise sich ergebende Verhältnifs der Geschwindigkeiten hat man Brechungsverhältnifs genannt. Wir wollen nun annehmen, dafs zwei Regimenter dicht hinter einander reiten, das erste, ein Kürassierregiment, habe gröfsere Pferde, das zweite, ein Husarenregiment, kleinere. Wäre der Acker so bearbeitet, dafs die Furchen dem Ausschreiten der grofsen Pferde entsprächen, so würden die kleineren Pferde, kürzer ausschreitend, bald in eine Furche treten, bald auf eine Erhöhung, der Acker würde also ihrem Fortschreiten ein

gröfseres Hindernifs entgegenstellen, als den grofsen Pferden. Da nun die Schwenkung von diesem Widerstande abhängt, so sieht man leicht, dafs die auf ebenem Felde parallelen Colonnen im beackerten Felde nach verschiedenen Richtungen fortschreiten werden. Bedeuten nun die Schritte der kleineren Pferde die kürzeren Wellenlängen des blauen Lichtes, die Schritte der gröfseren Pferde die längeren Wellenlängen des rothen Lichtes, so sieht man leicht, warum blaues und rothes Licht parallel einfallend durch die Brechung ungleich abgelenkt wird. Der Grund, warum bei senkrechter Incidenz, so wie bei dem Durchgange durch eine Planscheibe keine Farben entstehen, ist eben so einleuchtend. Da aber das Brechungsverhältnifs das Verhältnifs der Geschwindigkeiten in beiden Mitteln darstellt, so folgt daraus einfach, dafs die Wellenlängen des Lichtes in zwei Medien in diesem Verhältnisse zu einander stehen müssen, im dichteren Mittel also stets kleiner sind, wie auch die Verengerung der Farbenringe zeigte. Wellenlänge nämlich war ja nichts anderes, als das Fortschreiten der Erschütterung während der Zeit einer ganzen Undulation. Diese Zeit bleibt in beiden Medien dieselbe, der in dieser Zeit durchlaufene Weg wird also verändert, im Verhältnisse der veränderten Geschwindigkeit. Dafs das von Snellius gegebene Gesetz für die Bestimmung der Richtung des gebrochenen Strahles aus der jedesmaligen Richtung des einfallenden zu demselben Geschwindigkeitsverhältnisse des Lichtes in beiden Medien führt, wie das ist, welches aus der gemessenen Veränderung der Wellenlängen in beiden Mitteln folgt, wenn Interferenzerscheinungen nach einander zuerst in dem einen Mittel, dann in dem andern hervorgebracht werden, ist eine Verknüpfung der Erscheinungen der Brechung und der Interferenz, wie sie nur

in der Wellentheorie gegeben wird. Die empirische Entdeckung dieses Zusammenhanges gebührt Newton, aber in seiner Vorstellung der Anwandlungen ist gar kein Grund abzusehen, warum derselbe Statt findet. Die Dispersion des Lichtes heifst von unserm Gesichtspunkte aus also nichts anders, als dafs die Wellenlängen der verschiedenen Farben nicht in gleichem Verhältnisse verkürzt werden, d. h. dafs der Widerstand, welchen ein Körper der Fortpflanzung des Lichtes entgegenstellt, abhängt von der Oscillationsdauer der Schwingungen. So wie nun bei einer andern Entfernung der Furchen jenes Feldes die Pferde, welche vorher stärker aufgehalten wurden, nun schneller fortschreiten können, und umgekehrt, die vorher schneller fortschreitenden mehr verzögert werden, so ist eine Beschaffenheit des Materiellen denkbar, wo die rothen Strahlen mehr gebrochen werden, als die blauen. Dies scheint nach den Phänomenen der elliptischen Polarisation bei den Metallen der Fall zu sein.

Ein unüberwindlicher Widerstand für alle Arten von Schwingungen würde den Fall vollständiger Absorption darstellen, ein für bestimmte unbesiegbarer die Absorptionsfarben erklären. Ein rothes Purpurglas ist für alle Theile des Spectrums, aufser Roth, undurchsichtig, daher erscheint es auch, von weifsem Lichte durchstrahlt, roth, ein violettes verlöscht die Mitte des Spectrums, aber nicht seine Enden, daher erscheint es auch in weifser Beleuchtung mit diesen Farben. Zwei recht homogene, aber verschiedenfarbige Gläser über einander gelegt, bringen daher eine Verdunkelung hervor, welche in gar keinem Verhältnisse zu ihrer Durchsichtigkeit steht, weil das Licht, welches das eine durchdrungen hat, von dem andern aufgehalten wird. Man sieht

auf diese Weise die Entstehung eines immer dunkler werdenden Grau, in welchem man keine Spur von Farbe wahrnimmt, obgleich die Gläser, welche es zusammen hervorbringen, einzeln die lebhaftesten Farben zeigen, durch passend gewählte grüne und rothe Gläser z. B. die Sonne zu einer weifsen Scheibe ohne allen Glanz verdunkelt. Hingegen vermag Licht, welches eine dünne Schicht eines Körpers von reiner Farbe durchdrungen hat, viel mächtigere desselben Mittels ohne sichtbare Schwächung zu durchstrahlen. So sieht der Portwein in einem Glase so tief roth aus, als im stärksten Theile der Flasche. Die alkoholische Auflösung des grünen Farbestoffs der Pflanzen zeigt hingegen das Phänomen der Opalescenz, oder unvollkommener Durchsichtigkeit, d. h. das durch sie gesehene ursprünglich weifse Licht erscheint, mit Zunahme der Dicke der Schicht, stets anders gefärbt, weil die für homogene Farben einzeln untersuchte Absorption sich auf alle erstreckt, aber mit verschiedener Energie, so dafs eine nach der andern verlischt. Diese Erscheinung findet fast nie bei farbigen Gläsern statt, eben so selten bei chemischen Lösungen, woraus unmittelbar folgt, dafs Pflanzenpigmente sämmtlich Grau enthalten müssen. Allgemein also kann man die Entstehung der natürlichen Farben darauf zurückführen, dafs man sagt: wenn Licht in einen Körper dringt und vermöge Zurückwerfung, wie bei den katoptrischen Farben, oder vermöge Durchlassung, wie bei den dioptrischen Farben, in das Auge gelangt, so wird ein Theil desselben, nämlich Licht von bestimmter Wellenlänge, absorbirt, und die Farbe des Körpers ist die aus allen nicht verloren gegangenen resultirende, so dafs sie also die absorbirte zur Farbe der Beleuchtung ergänzt, demnach für weifse Beleuchtung ihre Ergänzungs-

farbe ist. Zum Hervortreten der Farbe gehört daher ein bestimmter Grad von Durchsichtigkeit; bei totaler Reflexion entsteht hingegen nur die Farbe der Beleuchtung und der Körper heifst dann weifs. Diese totale Reflexion tritt aber am leichtesten ein, wenn das Licht aus einem dichten durchsichtigen Medium in ein dünneres austreten will. Soll sie nach allen Richtungen geschehen, so müssen beide Medien häufig mit einander abwechseln. Weifse Körper sind daher ein inniges Gemenge von zwei durchsichtigen, welche recht verschieden das Licht brechen. So bildet Luft und Wasser, innig gemengt, Schaum und Wolken, Luft und Eis den blendend weifsen Schnee, ein zerstofsener Bergkrystall wird Sand, zerstampftes Glas bildet ein weifses Pulver. Hingegen wird der undurchsichtige, weifse Hydrophan im Wasser durchsichtig und farblos, weil beide gleiches Brechungsverhältnifs zeigen, geöltes Papier verliert mit steigender Durchsichtigkeit seine Weifse, die in der Kreide enthaltenen Kreidethierchen sondern sich von der gleichförmig schwach durchscheinenden Masse, wenn diese, von Kanadabalsam durchdrungen, durchsichtig wird etc. Eine besondere Klasse der dioptrischen Absorptionserscheinungen treten im polarisirten Lichte hervor, ein Farbengegensatz nämlich in der Achse und senkrecht auf dieselbe, von denen einige unter dem Namen des Dichroismus bekannt waren, aber vor Entdeckung der Polarisation unverständlich bleiben mufsten. Auch hier haben wir den Fall einer gleichmäfsig verdunkelnden Wirkung auf alle Theile des Spectrums im Turmalin, und ein bekanntes Beispiel einer ungleichmäfsigen am Dichroit, der daher auch, aber in geringerem Grade, als polarisirende Vorrichtung angewendet werden kann.

Läfst man weifses Licht durch eine Schicht Salpetergas

hindurchscheinen, so zeigt das Spectrum desselben mehrere hundert dunkle Querlinien, vom Violett an abnehmend an Schärfe und Dunkelheit nach dem Roth hin. Bei gröfserer Dicke der Schicht werden die Striche im Violett immer breiter, die im Roth deutlicher. Aehnlich, wie Verdichtung, wirkt Erhitzung. Das vorher fast farblose Gas wird allmählig blutroth, zuletzt so schwarz, dafs nicht ein Strahl der hellsten Sommersonne durchzudringen vermag. Erregt man gleichzeitig übereinander das gewöhnliche Spectrum und das Gasspectrum, so zeigt sich zwischen beiden die merkwürdigste Uebereinstimmung der Lage der Linien bei ungleicher Stärke derselben. Analog den Wirkungen des Salpetergases sind die des Jodgases und Bromgases, welche gleichweit abstehende Linien zeigen. Die zuerst auf einen geringeren Raum beschränkten Linien des Jodgases bereiten vom blauen Ende fortschreitend die Absorption vor, die zuletzt alles verlöscht, einen geringen Theil des Rothen ausgenommen. Da nun die Linien des Sonnenspectrums bei einer ringförmigen Sonnenfinsternifs übereinstimmen mit den bei voller Beleuchtung gesehenen, also nicht durch die Sonnenatmosphäre entstehen können [1]), da ferner bei niedrigem

[1]) Der Sirius giebt ein Spectrum mit andern Linien als die des Sonnenspectrums. Die Spectra vom Lichte des Mars und dem der Venus enthalten dieselben festen Linien, wie das vom Sonnenlicht, und genau an demselben Ort, wenigstens was die Linien D, E und F betrifft, deren relative Lage bestimmt werden konnte. Im Spectrum des Sirius konnten im Orange und Gelb keine festen Linien gesehen werden, aber ein sehr starker Streifen im Grün, und zwei im Blau, welche keiner der Linien im Planetenlicht ähnlich sind. Ganz damit stimmt das Spectrum von Castor überein. Im Spectrum des Pollux sind viele schwache Linien, welche wie die der Venus aussehen, D genau an derselben Stelle wie bei Planetenlicht. D und *b* am

Stande der Sonne im Blau und Roth Linien entstehen, welche bei hohem Sonnenstande nicht bemerkt werden, so folgt daraus, dafs, wenn die Luft in dünnen Schichten farblos erscheint, sie in mächtigen farbig werden mufs. Dafs die Sonne, durch eine bedeutende Luftschicht scheinend, gelbroth erscheint, ist daher eben nicht schwer einzusehen. An einem ganz heitern Tage des Sommers 1799 erhielt Hassenfratz um die Mittagszeit ein Spectrum von 360 Millimeter Länge, worin alle Farben vom Purpur bis zum Roth deutlich zu erkennen waren. Bei dem Untergang der Sonne, als sie gelb erschien, war das Spectrum viel kürzer, ein mehr oder weniger beträchtlicher Theil des Violett war verschwunden,

Spectrum der Capella entsprechen der Lage im Sonnenspectrum. Im Spectrum des Procyon erkennt man nur mit Mühe einige Linien (Frauenhofer in Gilb. Ann. 74 p. 377). Das Spectrum des aus Quecksilber gezogenen magnetoelectrischen oder galvanischen Funkens besteht aus zwei dicht zusammenliegenden orangefarbenen Linien, einer hellgrünen, zwei bläulichgrünen dicht nebeneinander, einer sehr hell purpurrothen und einer violetten. Damit übereinstimmende Resultate gaben aus Zink, Kadmium, Zinn, Wismuth und Blei im geschmolzenen Zustande gezogene Funken, allein die Anzahl, Lage und Farbe der Linien war bei jedem Metall eine andere. Die Spectra von Zink und Kadmium enthalten eine rothe Linie, welche den andern Spectris fehlt. Das Licht, welches diese Metalle bei ihrem Verbrennen in Sauerstoff entwickeln, giebt ein ganz verschiedenes Spectrum, hingegen wurde das des galvanischen Funkens nicht verändert, wenn der Versuch unter der Luftpumpe, im Toricellischen Vacuum, in Sauerstoff, Kohlensäure oder anderen Gasarten angestellt wurde, woraus hervorgeht, dafs das Licht nicht durch eine Verbrennung der Metalle entsteht. Die hellen Querlinien des electrischen Funkens, welche Frauenhofer bereits beobachtet hat, sind nach Lage und Zahl bei verschiedenen Metallen, aus welchen der Funke hervortritt, verschieden. Läfst man den Funken zwischen Kugeln von verschiedenen Metallen überspringen, so erblickt man gleichzeitig die Linien beider Metalle (Wheatstone in Pogg. Ann. 36 p. 148).

ja fehlte wie der Purpur zuweilen gänzlich. Am 15. Januar 1801 war die Länge des Spectrums Mittags 185 Millimeter lang, als die Sonne bei ihrem Untergang schön roth erschien nur 70 Millimeter und nur Roth, Orange und Grün zu unterscheiden. Dafs dem Sonnenlicht bei dem Durchgange durch die Atmosphäre, wenn es gelb, orange oder roth erscheint, mehrere Farben entzogen werden, folge, bemerkt Hassenfratz, aus dem Anblicke des Regenbogens, welcher dann nur Roth, Orange und Grün enthalte. Wäre die Trübung das Princip, so könnte die Sonne doch wohl hinter einer Wolke nicht vollkommen weifs erscheinen. Dafs wenigstens eine Farbenerklärung, die auf die nähere Natur des Trüben keine Rücksicht nimmt, unrichtig sei, geht schon aus der einfachen Thatsache hervor, dafs absorbirende tropfbare Flüssigkeiten bei Vergröfserung der Dicke der Schicht, welche das Licht durchdringt, nie zu neuen Strichen Veranlassung geben, dafs in diesen vielmehr die früheren bis zum Verschwinden der Farbe unverändert bleiben, und zwar zeigt sich dies selbst bei denen, welche im gasförmigen Zustande die eben erwähnten Erscheinungen entwickeln.

Die gleichweit abstehenden Linien des Spectrums des Jodgases erinnern so unmittelbar an Interferenzerscheinungen, dafs Wrede ganz mit dem Gasspectrum übereinstimmende Erscheinungen durch Interferenz hervorgebracht hat. Ein dünnes Glimmerblatt wird zu einem Cylinder umgebogen und vermittelst der aus dem von der Vorder- und Hinterfläche reflectirten Kerzenlichte gebildeten Lichtlinie ein Spectrum hervorgebracht, welches mit ganz schwarzen Linien durchzogen erscheint, deren Anzahl mit der Dicke des Blattes zunimmt. Dies sieht man am besten, wenn die Flächen des Blättchens sich etwas gegen einander neigen.

Die Anzahl und der Abstand der Linien ändert sich dann continuirlich, wenn man den Cylinder dreht. Läfst man das Licht nach einander von zwei Cylindern reflectiren, so erhält man Spectra mit zwei Reihen Absorptionen, deren Verhältnifs durch Drehung beider Cylinderflächen verändert werden kann. Hier also ist durch die Wellentheorie der Weg zur Erläuterung der Absorptionsfarben bereits eröffnet.

Dafs Körper eine bestimmte Art Schwingungen leichter vollführen, als eine andere, entbehrt in andern Gebieten nicht der Analogie, und so möchte die schöne, von Seebeck in Goethe's Farbenlehre mitgetheilte Entdeckung, dafs ein im blauen Lichte glühender Barytphosphor in gelber Beleuchtung wie eine ins Wasser getauchte Kohle erlischt, sich wenigstens deuten lassen, da sie mit der Emissionstheorie gar nicht vereinbar scheint.

Hier nun würde auch noch zu besprechen sein, wie die zu Schwingungen angeregte Netzhaut allmählig zur Ruhe zurückkehrt, oder wie sie sich verhält, im Uebergang aus einer Schwingungsart in die andere. Dafs eine mechanische Erschütterung in ihr auch Vibrationen erregen und daher einen Lichteindruck hervorbringen könne, ist bekannt. Die Entstehung der Complementarfarben bei den physiologischen Erscheinungen läfst sich aber immer darauf zurückführen, dafs die Netzhaut an den Stellen, wo sie lange Zeit einen Farbeneindruck empfangen, oder eine Farbenreaction geäufsert, auf einige Zeit unempfänglicher wird für diesen Eindruck, oder für diese Reaction, hingegen empfänglicher für die Schwingungen, welche sie vorher nicht vollführte [1]). Wer

[1]) In den folgenden Abhandlungen werden hierher gehörige Versuche ausführlicher besprochen werden.

lange Roth gesehen, wird in den darauf folgenden Vibrationen seiner Netzhaut sich nicht der Periodicität bewufst, welche diese Farbe hervorruft, daher sieht er statt weifs dann grün. Hier aber ist es, wo der Physiker den nähere Belehrung Wünschenden an den Physiologen verweist.

# Optische Untersuchungen.

# I. Stereoskopische Versuche.

## 1. Theorie derselben.

Da die Ansicht eines mit dem rechten Auge betrachteten Objectes von drei Dimensionen, wenn dieses nicht zu entfernt ist, eine andre ist als die mit dem linken Auge erhaltene, so schlofs Wheatstone [1]), dafs wir einen Körper als solchen sehen mittelst zweier verschiedener Netzhautbilder. Diese Ueberlegung führte ihn zu der Frage, was geschehen würde, wenn anstatt des Objectes selbst die Projectionen seines Bildes auf eine ebene Fläche, welche genau so nachgezeichnet wären, als sie einem Auge allein erscheinen müssen, gleichzeitig jedem Auge dargeboten würden. Diese Frage beantwortete das von ihm erfundene Spiegelstereoskop durch die merkwürdige Erscheinung, dafs wir statt der beiden Projectionen nun den Körper selbst sehen.

Gegen die Wheatston'sche Erklärung macht Bruecke [2]) geltend, dafs das Urtheil über die Entfernung eines Gegenstandes, wenn uns die perspectivischen Hülfsmittel für die Schätzung derselben abgehen, nur aus dem Bewufstsein der Convergenz der Sehachsen sich bildet, unter der wir denselben sehen, die in uns hervortretende Vorstellung, dafs das, was wir sehen, als Körper erscheine, involvire daher das Factum, dafs verschiedene

[1]) On some remarkable and hitherto unobserved phenomena of binocular vision Ph. Tr. 1838 p. 371.

[2]) Müllers Archiv 1841, p. 459.

Punkte in dem Angeschauten unter verschiedener Sehweite gesehen werden. Wir schliefsen daher aus der Veränderung der Convergenzpunkte der Augenachsen auf einen Körper, indem wir abwechselnd die näheren und die entfernteren Theile desselben ins Auge fassen.

Dieselbe Ansicht hat Prevost in einer im Jahr 1842 vor der *Société de Physique de Genève* gelesenen Abhandlung: *essai sur la théorie de la vision binoculaire,* ausgesprochen. Er sagt: *dans la vision binoculaire, il arrive ordinairement que l'attention se porte presque exclusivement sur le point de l'espace que l'on fixe. C'est en fixant successivement et rapidement les différentes parties des objets, que l'on parvient à reconnaitre leur figure et leur position dans l'espace.*

Auch hat sich schliefslich Brewster [1]) für diese Ansicht entschieden. Er sagt: »Betrachten wir mit einem Auge einen Körper, z. B. eine sechsseitige Pyramide, deren Spitze dem Auge zugekehrt ist, so erkennen wir mit einem Blick, dafs es nicht eine Zeichnung, sondern eine wirklich körperliche Pyramide ist. Wenn das Auge sich dem Scharfsehen der Spitze anpafst, so werden alle entfernteren Punkte nicht scharf gesehen, aber das Auge streift rasch über das Ganze hin, indem es sich dem Scharfsehen der Grundfläche und der Seitenkanten anpafst, und bei diesen aufeinander folgenden Bemühungen, einmal die Pupille und die Augenbrauen zu contrahiren, um nahe Punkte zu sehen, dann sie zu expandiren, um entferntere zu sehen, erhält es eine Kenntnifs des gegenseitigen Abstandes der verschiedenen Theile. Betrachten wir nun die Pyramide mit beiden Augen, so wird, wenn wir die Entfernung der Spitze oder eines andern Punktes zu schätzen suchen, die Convergenz beider Augen nach diesem Punkt hin ein sichereres Urtheil darüber erlauben, als mit einem Auge«. Genau wie Bruecke erklärt er nun das Relief des Stereoskop; verändern wir nämlich bei den gezeichneten Projectionen im Stereoskop die Augenachsen so, dafs wir einen nähern Punkt ins Auge fassen, als die Zeichnungen, so

[1]) On the law of visible position in single and binocular vision and on the representation of solid figures by the union of dissimilar plane pictures on the retina. Edinb. Trans. 1843, p. 349.

werden die Projectionen der Spitze auf die Grundfläche bei einer bestimmten Convergenz der Achsen sich decken, vermeiden wir die Convergenz, so werden es die Grundflächen thun, es tritt also aus dem continuirlichen Schwanken der Augenachsen hier dieselbe Vorstellung hervor, als aus dem bei dem Betrachten eines wirklichen Körpers.

In den Berichten der Berliner Akademie 1841, p. 252 habe ich Versuche beschrieben, welche mit der hier gegebenen Erklärung sich nur unter der Annahme vereinigen lassen, dafs die oscillatorische Bewegung der Augenachsen so schnell erfolgt, dafs sie in einer kürzern Zeit als der millionste Theil einer Secunde ausgeführt wird. Ob dies wahrscheinlich sei, mögen die Physiologen entscheiden.

In einem dunkeln Zimmer stellte ich ein gewöhnliches Spiegelstereoskop so auf, dafs die beiden Zeichnungen desselben von einer Lampe gleich hell beschienen waren. An die Stelle der Lampe wurde nun eine sich selbst entladende Lane'sche electrische Flasche gestellt, welche bei gleichbleibendem Drehen der Electrisirmaschine stets nach bestimmten Zeitintervallen sich entlud. Dadurch wurde es möglich, auf die momentane Erscheinung sich vorzubereiten. Ich sowohl als Andre, denen ich diese Versuche zeigte, sahen vollkommen deutlich das körperliche Relief, mitunter aber auch die beiden Projectionen, aus denen es entsteht. Nach den Versuchen von Wheatstone ist die Dauer des Leuchtens eines electrischen Funkens kürzer, als der zehnmillionste Theil einer Secunde. Während dieser Zeit müfste also der Convergenzwinkel der Augenachsen mindestens einmal um mehr als vier Grad verändert werden.

Durch diese Versuche ist erwiesen, dafs wir während eines Blitzes Körper als Körper sehen.

Betrachtet man den Reflex einer Lichtflamme in einem kreisförmig polirten Deckel, etwa dem des Objectivs eines Fernrohrs, so sieht man bekanntlich eine Lichtlinie, je nach der Neigung des Deckels entweder lothrecht oder sehr schief geneigt gegen die Oberfläche desselben. Vertauscht man die Lichtflamme mit dem Funken der sich entladenden Flasche, so sieht man diese stereoskopische Lichtlinie als Weg zweier Funken, die sich ent-

weder im Durchschnittspunkt der Linie mit der Fläche des Deckels in der Mitte desselben begegnen, also auf einander zugehen, oder von ihm nach entgegengesetzten Richtungen hin auszugehen scheinen. Die Erklärung liegt darin, dafs wir uns nach der zufälligen Richtung der Augenachsen nicht der Beleuchtung des Randes in demselben Moment bewufst werden, als der der Mitte. Dieser Versuch scheint für einen Zustand der Ruhe des Auges während des momentanen Leuchtens zu sprechen.

## 2. Stereoskopische Erscheinungen ohne Anwendung eines besonderen Instrumentes.

1. Wenn zwei Personen mit auf einander gelegten Stirnen einander in die Augen sehen, so gehen für jeden die Augen des andern zuletzt in einem grofsen Auge in der Mitte der Stirn zusammen.

2. Wer sich im Doppeltsehen geübt hat, kann die beiden stereoskopischen Bilder neben einander legen, sie durch Doppeltsehen in einer Richtung, parallel der Verbindungslinie beider Augen, in vier verwandeln, die beiden mittleren zum Decken bringen und erhält dann das Relief in der Mitte zwischen seinen beiden Projectionen. Einen sonderbaren Eindruck macht es, wenn die Bilder sich zum Relief vereinigen. Es ist, als wenn sie, so wie sie sehr nahe an einander gekommen sind, sich mit beschleunigter Geschwindigkeit anzögen.

3. Durch folgenden Versuch kann man sich überzeugen, dafs nur bei binocularem Sehen das umgekehrte Bild im Hohlspiegel vor demselben erscheint. Man nähert einen an einem Stift befestigten Ring, z. B. den einer Berzelius'schen Lampe, dem Hohlspiegel so, bis beide durch einander hindurchgehen und das vergröfserte Bild des Ringes zwischen dem Auge und dem wirklichen Ringe steht. Schliefst man nun das linke Auge, so tritt das Bild des Ringes augenblicklich hinter denselben zurück. Der abgekürzte Hohlkegel, welcher dem Auge seine Grundfläche zukehrte, wendet nun plötzlich ihm seine Schnittfläche zu. Nähert man bei dem Sehen mit einem Auge die

Hand plötzlich dem Spiegel, so glaubt man allerdings auch monocular die Hand sich nähern zu sehen. Dies ist aber nur eine bei schneller Bewegung eintretende Täuschung, da man sich nicht vorstellen kann, dafs die an der Stelle bleibende Hand gröfser wird.

Ich stellte eine kleine Gypsbüste so vor den schön geschliffenen Hohlspiegel eines Amici'schen Mikroskops, dafs das binocular gesehene umgekehrte Bild desselben in gleicher Gröfse unmittelbar neben dieselbe fiel. Bei unverrückt bleibender Stellung des rechten Auges schlofs sich das linke. Augenblicklich trat das Bild in die Fläche des Spiegels zurück und erschien nun viel gröfser, weil es, unter demselben Gesichtswinkel gesehen, nun in gröfserer Entfernung zu stehen schien.

Auf diese Weise erklärt sich, dafs bei Anwendung stereoskopischer Apparate, besonders wenn man die Zeichnungen aus gröfserer Entfernung betrachtet, bei Vertauschung beider Projectionen mit einander convexe Reliefe weniger erhaben erscheinen als concave. Man setzt nämlich die Ebene des Papiers, auf welcher als Grundfläche die Zeichnung ausgeführt ist, in beiden Fällen in gleiche Entfernung. Dafs dies der Grund der Erscheinung sei, geht daraus hervor, dafs hierbei die Seitenflächen einer abgekürzten Pyramide weniger steil gegen die Grundfläche geneigt zu sein scheinen, wenn die Schnittfläche dem Auge zugekehrt ist, als wenn man in die hohle Pyramide hinein zu sehen glaubt. Da man nämlich die Schnittfläche in beiden Fällen unter gleichem Sehwinkel sieht, im zweiten Falle sie weiter zu sehen glaubt, so erregt sie die Vorstellung eines gröfsern in gröfserer Entfernung gesehenen Schnittes. Deswegen erscheint die Neigung vermindert.

Bei vergleichenden stereoskopischen Untersuchungen müssen die Bilder stets in gleichbleibender Entfernung liegen. Man vermeidet dadurch die Gröfsenveränderungen, welche sogleich eintreten, wenn man das Relief in richtiger Entfernung erhalten hat und indem man eine Zeichnung verschiebt und das Anpassungsvermögen des einen Auges ändert, das andre Auge zwingt, ein gleiches zu thun. Als Kennzeichen einer guten Combination kann es dienen, dafs wenn man den Kopf langsam

seitlich hin und her bewegt, das Relief in eine langsam schwingende Bewegung versetzt wird.

### 3. Erscheinungen, wenn die beiden im Stereoskop betrachteten Projectionen des Körpers verschieden gefärbt sind.

Die Beschreibung, dessen, was man sieht, wenn man dem rechten Auge eine andre Farbe darbietet als dem linken, fällt bei verschiedenen Beobachtern sehr verschieden aus. Einige sehen abwechselnd eine Farbe nach der andern, einige farbige Flecke der einen neben farbigen Flecken der andern, endlich einige die aus beiden Farben entstehende Mischungsfarbe. Streng genommen liegt in dieser Beschreibung das Gemeinsame, das alle zugeben, dafs unter gewissen Bedingungen eine Combination beider Farben möglich sei, denn das Nacheinander mufs einen Durchgangspunkt haben, wo die abklingende Farbe eben so stark wird, als die in das Bewufstsein tretende, das Nebeneinander mufs Stellen des Uebergangs haben, da die Flecke neben einander sich nicht scharf gegen einander abgrenzen. Es sind dies also dieselben Zustände, welche sich bei der dritten Art auf längere Zeit hervorbringen lassen.

Dafs die durch Polarisation entstehenden Complementarfarben, wenn sie gesondert den beiden Augen dargeboten werden, sich zu Weifs neutralisiren, habe ich auf folgende Weise erhalten [1]). In die Seitenwände eines Stereoskops gewöhnlicher Construction wurden zwei grofse Löcher geschnitten, welche einander beim Hineinsehen in die Spiegel deckten. Um diese Oeffnungen durch volles Licht gleichförmig zu beleuchten, waren aufserhalb dieser Oeffnungen drehbare Reflectoren, wie bei dem Sonnenmikroskop angebracht. Die Spiegel des Stereoskops waren unbelegte Polarisationsspiegel. Vor denselben befand sich eine Vorrichtung nach Art einer Brille, in deren Oeffnungen zwei Nicol'sche um ihre parallelen Achsen drehbare Prismen eingeschraubt wurden. Ein in eine Ebene ausgespanntes Glimmerblatt

[1]) Berichte der Berliner Akademie 1841, p. 251.

wurde nun zwischen die Prismen und die Polarisationsspiegel eingeschaltet. Standen die Polarisationsebenen beider Prismen auf einander senkrecht, so erschien bei dem Schliefsen des linken Auges für das rechte die complementare Farbe von der, welche man beim Schliefsen des rechten Auges mit dem linken erblickte. Bei dem Sehen mit beiden Augen erschien die Oeffnung farblos. Für Complementarfarben gleicher Intensität ist es also gleichgültig, ob die Farben sich auf der Netzhaut eines Auges wirklich decken, oder ob sie gesondert auf die Netzhäute beider Augen fallen.

Wendet man hingegen statt der Polarisationsfarben Pigmente oder die Absorptionsfarben durchsichtiger Gläser an, so wird man sich leicht nur des Farbeneindrucks des einen Auges bewufst, besonders wenn die Intensität der den beiden Augen dargebotenen Farben verschieden ist, während doch, wenn einem Auge zwei Farben dargeboten werden, ihre Mischungsfarbe gesehen wird, wie verschieden auch die Intensität der Componenten sein mag. Es würde daraus folgen, dafs, wenn zwei Wellensysteme gleichzeitig eine Netzhaut erschüttern, wir uns des daraus resultirenden Systems stets bewufst werden; afficiren hingegen zwei Systeme gesondert beide Netzhäute, dies nur dann stattfindet, wenn die Elongation der Schwingungen beider nahe gleich oder nicht zu sehr verschieden ist. Im ersten Falle kann man daher nicht das resultirende System in seine Componenten zerlegen, indem man eine der Componenten absichtlich übersieht. Im letztern Falle ist dies möglich, weil beide Systeme sich faktisch nicht zu einem resultirenden combiniren.

Wirft man die durch Doppelbrechung entstandenen Spectra eines gleichseitigen Bergkrystallprismas, dessen Kanten der Achse parallel sind, auf eine weifse Wand, so sieht man da, wo das violette Ende des einen Spectrums über das rothe Ende des andern greift, eine sehr schöne Purpurfarbe entstehen, welche sich in ihre Componenten zerlegen läfst, wenn man die unmittelbar mit dem Auge aufgefangenen Spectra durch ein Nicol'sches Prisma analysirt, bei dessen Drehung einmal das Violett, dann das Roth als senkrecht auf einander polarisirt verschwindet. Wirft man hingegen das Spectrum eines gleichseitigen Flint-

glasprisma auf die Wand und betrachtet dasselbe durch ein galiläisches und astronomisches Fernrohr gleicher Vergrößerung, von denen das eine vor das rechte, das andere vor das linke Auge gehalten wird, und zwar so, daſs die Bilder einander in umgekehrter Lage decken, so verschwindet das Violett in der Weise gegen das Roth, daſs man sich des Eindrucks des letztern an den Grenzen der beleuchteten Stelle allein bewuſst wird, wenn man mit beiden Augen gleich scharf sieht. Der Uebergang des Feuerroth durch Purpur in Violett erscheint erst, wenn man die Sehkraft des einen Auges absichtlich schärft, so daſs von den einander deckenden Bildern das eine zuletzt ganz verschwindet [1]). Auf diese Weise scheinen sich die verschiedenen Ergebnisse zu erläutern, welche in den Angaben der Versuche verschiedener Beobachter sich finden, welche ihren Augen gesonderte Farbeneindrücke darbieten.

Alles bisher Gesagte gilt in Beziehung auf farbige Flächen. Bei den nachfolgenden Versuchen [2]) waren hingegen die im Stereoskop gesehenen Flächen in der Regel farblos, weiſs oder schwarz, die Umrisse der beiden Projectionen hingegen durch verschiedenfarbige Linien dargestellt. Bevor wir aber zur Erörterung derselben übergehen, müssen wir vorher untersuchen, was eintritt, wenn der Farbeneindruck für beide Augen derselbe ist.

Werden beiden Augen im Stereoskop dieselben Farben dargeboten, so combiniren sich diese in eben der Weise, als wenn die Zeichnungen weiſs auf schwarzem Grund oder schwarz auf weiſsem Grund ausgeführt sind. Für dioptrische Farben erhält man dies am besten, wenn man die Zeichnung weiſs auf schwarzem Grund ausführt und durch ein groſses beide Augen bedeckendes Glas betrachtet. Für katoptrische Farben ist es am besten, die Umrisse mit lebhaften Farben auf weiſsem Grund zu entwerfen.

Dasselbe gilt für subjective Farben. Betrachtet man durch ein farbiges Glas bei vollkommnen Ausschluſs des diffusen Tageslichts eine auf einem weiſsen Bogen mit schwarzen Linien

[1]) Berichte der Berliner Akademie 1850, p. 152.
[2]) Berichte der Berliner Akademie 1851, p. 246.

ausgeführte Zeichnung, so sieht man das Relief mit schwarzen Kanten in der durch das Glas hervorgerufenen farbigen Beleuchtung. Hält man hingegen das farbige Glas in einiger Entfernung vom Auge, so dafs das weifse zerstreute Tageslicht das Auge ebenfalls trifft, so erscheinen die schwarzen Linien lebhaft subjectiv gefärbt und desto lebhafter, je länger man die Zeichnung betrachtet, in einem durch Kobalt blau gefärbten Glase roth, in einem rubinrothen Glase bläulich grün. Dieselbe Färbung zeigt sich an den Kanten des Reliefs, wenn man mit beiden Augen durch das farbige Glas in das Stereoskop sieht, diese Linien mögen nun gerade oder gekrümmte sein.

Ich zeichnete nun auf weifsen Grund mit rothen Linien die Projection einer Pyramide, welche ein convexes Relief darstellte, und über derselben Grundfläche mit blauen Linien die Projection einer gleichen Pyramide, welche bei stereoskopischer Combination hohl erscheint. Das zweite Blatt enthielt die entsprechenden Projectionen mit denselben Farben. Hätten sich die Eindrücke in gleicher Weise combiniren lassen als ihre beiden Componenten, so hätte die senkrechte Achse der convexen rothen Pyramide die Verlängerung gebildet der ebenfalls senkrechten Achse der hohlen blauen Pyramide. Es ist aber hier unmöglich ein Relief zu erhalten, man sieht stets einen von einem Sechsseit umschlossenen sechsseitigen Stern, dessen sämmtliche Linien aus nebeneinander liegenden blauen und rothen Linien gebildet sind. Hierbei tritt die sonderbare Erscheinung ein, dafs die Ansicht mit einem Auge in viel höherem Grade den Eindruck eines Körpers macht, als die mit zwei Augen, weil im ersteren Falle zwei perspective Zeichnungen an einen Körper erinnern und deswegen zwei schiefe Pyramiden nach entgegengesetzten Seiten sich über die Grundfläche zu erheben scheinen, indem die Farbe das Zusammengehörige in zwei Gruppen sondert. Betrachtete ich nun die im Stereoskop binocular gesehene complicirte ebene Figur durch ein blaues Glas, so erschien die convexe Pyramide gebildet durch rothe Linien, betrachtete ich sie hingegen durch ein rothes Glas, so erschien die hohle Pyramide gebildet durch blaue Linien. Im ersten Falle nämlich verschwanden die blauen Linien fast vollständig in einer blauen Beleuch-

tung, während die durch das blaue Glas absorbirten rothen Linien wie schwarze wirkten und sich daher röthlich subjectiv färbten, hingegen orange, wenn das blaue Glas durch Hinzufügung eines schwach grünen prismatisch untersucht homogen war. Im letzten Falle verschwanden die rothen in der rothen Beleuchtung und die blauen Linien verbanden sich subjectiv gefärbt zu einem Relief. Die in der gleichfarbigen Beleuchtung nicht vollkommen verschwindenden Linien lagen in beiden Fällen gesondert in der Grundfläche der Pyramide neben einander.

Das Ergebnifs dieses Versuches ist merkwürdig. Jedem Auge werden zwei Ansichten dargeboten und dadurch ist eine doppelte Verbindung dieser vier Ansichten möglich. Hält das Auge die Identität des Umrisses fest und bekümmert es sich nicht um die Ungleichheit der Farbe, so mufs es zwei ebene Darstellungen sehen aus verschiedenen Farben zusammengesetzt. Das geschieht, wenn die Intensität der vier Bilder dieselbe ist. Wird diese aber sehr ungleich in Beziehung auf das körperlich zusammengehörige und das nicht dazu gehörige, so tritt die Identität des Umrisses zurück gegen die Vorstellung des Reliefs.

Aus diesen Versuchen geht hervor, dafs die Anforderungen, welche wir an die Vorstellung des Reliefs machen, strenger sind, als die, welche bei den Beziehungen stattfinden, welche in einer Ebene liegend vorgestellt werden. Dafür spricht auch folgender Versuch. Ich zeichnete von einer sechsseitigen Pyramide für ein Auge die Projection vollständig, für das andere die Grundfläche und drei Seitenkanten und erhielt nur die halbe Pyramide, die einzeln gebliebenen drei Seitenkanten lagen flach auf dem Boden der Pyramide und erhoben sich erst, als die entsprechenden in der andern Zeichnung hinzugefügt wurden. Hingegen ergänzten sich die Grundkanten, wenn sie alternirend in jeder der beiden Zeichnungen fehlten, zu einem gemeinsamen Umrifs.

Dennoch kann auch der stereoskopischen Anschauung zu Hülfe gekommen werden. Ich nahm ein Bergkrystallprisma, in welchem, wenn es als Prismenstereoskop gebraucht wurde, also das durch das Prisma gesehene Bild mit dem mit bloſsem Auge betrachteten combinirt wurde, zwei nahe neben einander liegende

Bilder gleicher Intensität erzeugt wurden. Es ist klar, dafs nur eins dieser Bilder das mit bloſsem Auge gesehene decken konnte. Dennoch erschien das Relief sehr deutlich aber mit verdoppelten Kanten, vielleicht deswegen, weil die Lichtstärke des mit bloſsem Auge gesehenen Bildes die Summe der Intensitäten der beiden durch das Prisma gesehenen Bilder war.

Als Uebergang der Erscheinungen, welche sich zeigen, wenn bei stereoskopischen Versuchen den beiden Augen verschiedene Farben dargeboten werden, wollen wir zunächst untersuchen, was eintritt, wenn weiſs und schwarz stereoskopisch combinirt werden.

Ich zeichnete die Projection für das eine Auge mit weiſsen Linien auf matt schwarzen Grund, für das andere Auge mit schwarzen Linien auf weiſsen Grund. Bei stereoskopischer Combination erhält man einen höchst merkwürdigen Anblick. Das Relief von grauen Flächen begrenzt, die wie Graphit glänzen, zeigt Kanten, die ihrer ganzen Länge nach aus blendend weiſsen und tief schwarzen einander seitlich berührenden Linien begrenzt sind. Liegt das schwarze Blatt mit den weiſsen Linien vor dem linken Auge, das Blatt mit den schwarzen Linien auf weiſsem Grund vor dem rechten, so liegen die weiſsen Linien rechts neben den schwarzen, vertauscht man die Blätter vor den Augen, so kehrt sich auch die Anordnung der Linien um. Die seitliche Verschiebung ist daher immer eine gekreuzte.

Genau wie Weiſs und Schwarz verhalten sich Farbencombinationen unter einander und mit Weiſs, sie mögen nun dioptrisch oder katoptrisch hervorgebracht sein. Um die Combination dioptrischer Farben mit Weiſs und dieser unter einander zu erhalten, bedient man sich Zeichnungen, die mit weiſsen Linien auf schwarzem Grund entworfen sind. Im ersten Falle hält man nur vor das eine Auge ein farbiges Glas, im letzteren vor beide, aber vor das eine Auge ein anders gefärbtes als vor das andere. Den schönsten Anblick gewährt das Relief, wenn ein tief blaues und rothes Glas combinirt werden. Das Relief erscheint in violetter Beleuchtung mit prachtvollen aus rothen und blauen einander parallel berührenden Linien bestehenden Kanten. Aber auch bei einander nahe stehenden Farben bestehen die Kanten aus der

ganzen Länge nach einander berührenden Farben und zwar ist die seitliche Verschiebung eine gekreuzte, d. h. die mit dem linken Auge gesehene Farbe erscheint rechts, die mit dem rechten Auge gesehene links.

Ganz analog sind die Erscheinungen bei der Combination katoptrischer Farben. Hier werden die Umrisse auf weifsem Grund mit für die beiden Augen verschiedenen Pigmenten ausgeführt. Um dioptrische mit katoptrischen Farben zu combiniren, betrachtet man eine auf schwarzem Grund mit weifsen Linien ausgeführte Zeichnung durch ein vor das eine Auge gehaltenes Glas, mit dem andern blofsen Auge eine mit farbigen Linien auf weifsem Grund ausgeführte. Die Ergebnisse bei allen diesen Versuchen sind dieselben.

Sehr merkwürdig sind folgende Erscheinungen, die ich eben deswegen auch von andern Beobachtern mir habe durch Wiederholung mit gleichem Erfolg bestätigen lassen. Ich zeichnete mit weifsen Linien auf schwarzen Grund über derselben Grundfläche die Projection einer convexen und concaven Pyramide, auf ein zweites Blatt nur die Projection derselben convexen Pyramide für das linke Auge. Brachte ich nun das rubinrothe Glas vor das linke Auge, während die erste Zeichnung sich vor dem rechten Auge ohne Farbenglas befand, so erschien die Pyramide und die Projection, aber es hing von meiner Willkür ab, die Pyramide aus weifsen und rothen Kanten bestehend zu sehen, und die Projection dann aus weifsen Linien, oder die Pyramide mit weifsen Kanten und die Projection dann aus weifsen und rothen Linien. Ich habe genau dieselben Resultate mit den verschiedensten katoptrischen und dioptrischen Combinationen erhalten. Es geht daraus hervor, dafs sich eine Projection als Contour mit einer andern zum Relief verbinden kann, und mit einer zweiten Projection als Farbe. Als Analogon dieses Versuches in dem Sinne, dafs eine Zeichnung für zwei andere die Rolle des entsprechenden Bildes übernimmt, kann der mit dem Bergkrystallprisma angestellte pag. 170 erwähnte Versuch gelten.

Dieselben Erscheinungen, welche wir mit objectiven Farben erhalten, zeigen sich auch mit subjectiven. Die auf weifsem

Grund mit schwarzen Linien ausgeführten Zeichnungen betrachtete ich im Stereoskop, indem ich vor das eine Auge das rubinrothe Glas hielt, vor das andere das durch Kobalt blau gefärbte, und zugleich beide Augen durch das diffuse weifse Tageslicht treffen liefs. Auch hier bestanden alle Kanten des in voller Deutlichkeit hervortretenden Reliefs aus zwei parallelen ihrer ganzen Länge nach einander berührenden farbigen Linien, bläulich grün und roth, die durch den Gegensatz sehr lebhaft erscheinen. Zweckmäfsig hierbei ist, wenn die Durchsichtigkeit der Gläser sehr verschieden ist, diese Ungleichheit dadurch zu compensiren, dafs man die durch das helle Glas gesehene Zeichnung verhältnifsmäfsig schwächer beleuchtet. Auch diese subjectiven Farben erschienen kreuzweise verschoben; hielt man nämlich das rubinrothe Glas vor das linke Auge, das blaue vor das rothe, so erschienen die bläulich grünen Linien rechts neben den rothen.

Ich zeichnete auf ein rothes und auf ein grünes Papier mit schwarzen Linien die Projectionen eines Körpers, wie sie der Ansicht des rechten und linken Auges entsprechen. Im Stereoskop gleichzeitig gesehen, erschien das Relief mit schwarzen Kanten auf fast farblosem Grunde. Betrachtete ich hingegen dieses Relief durch ein vor beide Augen gehaltenes violettes Glas, so erschien der Körper auf weifsem Grunde mit Kanten, die aus hellblauen und dunkelbraunen einander berührenden Parallellinien zusammengesetzt waren. Auch in diesem Falle waren die neben einander sichtbaren Farben die, welche man einzeln erblickte, wenn man abwechselnd durch das violette Glas mit dem einen oder mit dem andern Auge die Zeichnungen betrachtete.

Alle bisher beschriebenen chromatischen Versuche wurden mit dem gewöhnlichen Wheatstone'schen Stereoskop und mit gleichem Erfolge mit den von mir im Folgenden beschriebenen verschiedenen Prismenstereoskopen angestellt. Sie können daher weder durch die bei Spiegelungen belegter Glasflächen entstehenden Nebenbilder, noch durch Fehler der Zeichnungen erklärt werden. Ihre Erklärung mufs daher in der Structur des Auges selbst gesucht werden.

Dafs das Auge nicht vollkommen achromatisch ist, ist seit Frauenhofers Untersuchungen anerkannt und durch spätere Versuche bestätigt. Es giebt dafür einen sehr einfachen Beweis, eine Beobachtung, die vor zwölf Jahren von Hrn. Plateau und von mir unabhängig von einander gemacht wurde. Betrachtet man nämlich durch ein violettes Glas, welches bei prismatischer Analyse die Enden des Spectrums hindurchläfst, dessen Mitte aber verlöscht, eine Lichtflamme, so sieht man in der Weite des deutlichen Sehens die Lichtflamme violett, in einer gröfsern Entfernung eine rothe Flamme in einer gröfsern blauen, welche nach allen Seiten hin die erste übergreift und desto breiter umsäumt, je weiter die Lichtflamme sich vom Auge entfernt, in gröfserer Nähe als die Sehweite hingegen die violette Flamme von einem scharfen rothen Rand umsäumt. Aus einer mittleren Entfernung sieht ein weitsichtiges Auge das letztere, wenn ein kurzsichtiges das erstere wahrnimmt. Ich habe seit dieser Zeit, um auf diese Weise die Sehweite zu prüfen, hunderte von Individuen untersucht, und nie ein Auge gefunden, welches für alle Entfernungen der Bedingung der Achromasie entspräche. Was für ein Auge hier gesagt wird, gilt ebenso, wenn beide Augen durch dasselbe violette Glas die Lichtflamme betrachten. Bekannt mit diesen Erscheinungen fiel es mir auf, dafs ich bei der stereoskopischen Betrachtung weifser auf schwarzen Grund gezeichneter Umrisse, wenn sie durch farbige für beide Augen verschiedene Gläser betrachtet werden, die Breite der Farbensäume in demselben Verhältnifs sah, als bei den früheren Versuchen mit der Lichtflamme diesseits und jenseits der mittleren Sehweite, es lag daher nahe, in der Nichtachromasie des Auges den Grund der erwähnten stereoskopischen Erscheinungen zu suchen.

Ich betrachtete daher eine feine weifs auf schwarzem Grund gezeichnete Linie nach einander mit den einzelnen oben angewendeten farbigen Gläsern, und fand, dafs die Linie, um durch das rothe Glas deutlich gesehen zu werden, weiter vom Auge entfernt werden mufste, als bei Betrachtung durch das blaue. Dies ist analog dem von Brewster (*Report. of the British Assoc.* 1848 p. 48) für Pigmente erhaltenen Ergebnifs. Ich

schichtete nun verschiedene aus einem dünnen Brett geschnittene Vierecke von verschiedener Gröfse und mit lebhaften Farben gemalt so über einander, dafs sie im verjüngten Mafsstab treppenartig über einander lagen, indem die Ränder der untern über die der darauf gelegten kleinern hervorragten. Solcher Pyramiden wurden zwei neben einander gebildet, in denen die gleich grofsen Stufen entgegengesetzt gefärbt waren, so dafs die eine Pyramide mit einer blauen, die andere mit einer rothen Grundfläche begann. Es erschien nun ein blaues Viereck über einer rothen Grundfläche stets höher, als das rothe über der blauen, so dafs bei weiterem Aufbau die Pyramiden einander abwechselnd an Höhe übertrafen. Aus diesen Versuchen folgt, dafs die Convergenzlinien beider Augen bei deutlichem Sehen für rothes Licht einen spitzern Winkel bilden als für blaues. Hält man daher vor beide Augen dasselbe farbige Glas, so wird sich die Accommodation beider ändern müssen, wenn man mit der Farbe des Glases wechselt. Für die, welche mit beiden Augen gleich gut sehen, wird die Accommodation bei dem gewöhnlichen Sehen für beide Augen stets dieselbe sein, proportional nämlich dem Winkel der Convergenzlinien beider Augen. Hält nun ein solcher Beobachter vor das eine Auge ein farbiges Glas, vor das andere Auge ein anderes farbiges, so stellt er den Augen die Aufgabe, die gleiche Accommodation beider oder wenigstens das Verhältnifs derselben unter der Voraussetzung, dafs sie für beide Augen nicht gleich sei, zu verändern, und da dieser Aufgabe nicht genügt werden kann, so werden sich die Bilder nicht decken, sondern aus sich kreuzenden Richtungen auf eine Fläche projicirt werden, die nicht im Durchschnittspunkte beider Richtungen liegt; und in der That dieselben Erscheinungen wie im Stereoskop treten freilich weniger deutlich auch bei gewöhnlichem binocularem Sehen eines mit weifsen Linien auf schwarzem Grund gezeichneten Gegenstandes hervor, nämlich ein paralleles Nebeneinanderlegen einander berührender farbiger Linien, wenn man mit dem rechten Auge durch ein Glas ihn betrachtet, dessen Farbe eine andere ist, als die des Glases, durch welches er gleichzeitig mit dem linken Auge gesehen wird.

Betrachtet man binocular mit bloſsen Augen einen weiſsen Gegenstand oder überhaupt einen nicht monochromatischen, so kann der Bedingung des deutlichen Sehens streng genommen nicht durch einen Convergenzwinkel der Sehrichtungen beider Augen entsprochen werden, sondern durch mehrere, im ersten Falle durch eine Anzahl zwischen den Grenzen für die rothen und blauen Strahlen. Man kann sich nun vorstellen; daſs die Augenachsen zwischen jenen Grenzen ununterbrochen oscilliren, oder das sie innerhalb der Grenzen jenes lothrecht auf die Verbindungslinie der Augen liegenden Spectrums, welches bei dem Weiſssehen der Bedingung der Deutlichkeit für alle homogenen Farben entsprechen würde, auf einen bestimmten Punkt dieses Spectrums gerichtet sind. Das letztere ist mir das Wahrscheinliche, weil ich binocular eine Linie weiſs sehe, wenn ein elektrischer Funke momentan das Dunkel erleuchtet und sie auch stereoskopisch combiniren kann, die kurze Lichtdauer mir aber die Möglichkeit einer Oscillation der Augenachsen während dieses Leuchtens auszuschlieſsen scheint. Durchschneidet man nun die linksliegenden Schenkel der den einzelnen Farben entsprechenden Convergenzlinien mit einem rothen Glase, die rechtsliegenden mit einem blauen, welches wie das von mir angewandte bis zum violetten Ende des Spectrums diaphan ist, so werden von den linksliegenden Schenkeln nur die rothen, von den rechtsliegenden nur die blauen übrig bleiben, welche auf eine Entfernung bezogen werden, die der mittleren Convergenz bei Betrachtung eines weiſsen Gegenstandes entspricht. Nun ist es aber äuſserst wahrscheinlich, daſs diese Entfernung nicht in der Mitte der Grenzen für die rothen und blauen Strahlen liegen wird, sondern wegen der gröſsern Helligkeit der weniger brechbaren mehr nach dem rothen Ende hin. Daher werden auf der Projectionsebene sich die Strahlen kreuzen, wegen des breiten Raumes am blauen Ende aber die blauen Linien breiter sein als die rothen. Dies ist aber genau die Erscheinung, wie sie wirklich gesehen wird.

Aus dem eben Erläuterten folgt, daſs man farbige Linien neben einander, farbige Flächen vor einander sehen wird. Dafür sprechen aber folgende Versuche:

## 4. Entstehung des Glanzes.

Ich hatte die Schnittfläche einer abgekürzten Pyramide in einer Projection mit einem gesättigten Blau, in der andern mit Gelb bedeckt. Wenn bei stereoskopischer Combination daraus Grün entstand, so war es mir im Moment, wo dies eintrat, als wenn ich durch die eine durchsichtig gewordene Farbe die andere hindurchsehe. Dafs viele die Farben nur nach einander sehen, entweder die eine oder die andere, liegt einfach darin, dafs dieselben die Anpassung der Augen für beide Farben abwechselnd ändern und sich nur der Grenzen dieser Aenderung, nicht der Mittelstufen bewufst werden. Bei der Combination zu Grün schien mir und Andern die Farbe wie mit einem Firnifs bedeckt. Dieses Glänzendwerden der Mischung hatte auch Herr Oertling bemerkt, als er verschieden gefärbte Zweiecke einer nach Art eines Luftballons gemalten Halbkugel stereoskopisch combinirte. Aber diese Erscheinungen sind so wenig auffallend, dafs sie von vielen nicht gesehen werden. Betrachtet man hingegen bei stereoskopischer Combination die gelb und blau gemalte Schnittfläche der Pyramide durch ein vor beide Augen gehaltenes violettes Glas, so erscheint sie spiegelnd wie ein polirtes Metall, für ein einzelnes Auge hingegen matt. Wahrscheinlich bewirkt das violette Glas, dafs die beiden zusammentretenden Farben durch das ungleiche Absorptionsvermögen zu gleicher Intensität gebracht werden.

Unter allen Fällen, wo eine Fläche glänzend erscheint, ist es immer eine spiegelnde durchsichtige oder durchscheinende Schicht von geringer Mächtigkeit, durch welche man hindurch einen anderen Körper betrachtet. Es ist also äufserlich gespiegeltes Licht in Verbindung mit innerlich gespiegeltem oder zerstreutem, aus deren Zusammenwirkung die Vorstellung des Glanzes entsteht. Dies steigert sich bei der Anzahl der Abwechselungen beider Körper. Daher nimmt aufgeblätteter Glimmer Metallglanz an, Sätze von Glasscheiben hingegen Perlmutterglanz. Die beiden auf das Auge wirkenden Lichtmassen wirken auf dasselbe aus verschiedenen Entfernungen. Indem nun das Auge sich dem

durch die durchsichtige Schicht gesehenen Körper anpafst, kann das von der Oberfläche zurückspiegelnde Licht nicht deutlich gesehen werden und das Bewufstwerden dieser undeutlich wahrgenommenen Spiegelung erzeugt die Vorstellung des Glanzes. Der Glanz ist daher stets im eigentlichen Sinne ein falscher, ein Beiwerk, welches blenden kann, das aber, wenn wir es beachten, die Sache auf die es ankommt, scharf ins Auge zu fassen verhindert. Er verschwindet daher, wenn man die Spiegelung fortschafft, indem man unter dem Polarisationswinkel durch ein Nicol'sches Prisma auf den Firnifs eines Gemäldes sieht. Die Modificationen, welche durch den Reflex des Lichtes der spiegelnden Flächen aus dem Gangunterschied zweier Lichtmengen in Beziehung auf die daraus resultirenden Lichtschwingungen entstehen, sind daher nicht die Ursachen des Glanzes, sondern vielmehr Nebenfolgen der Bedingungen, unter welchen er überhaupt entsteht.

## 5. Ableitung der Irradiation.

Aus allen bisher erörterten Versuchen geht mit Entschiedenheit hervor, dafs Weifs und Schwarz sich in Beziehung auf das Auge genau so verhalten, wie zwei verschiedene Farben. So wie die rothen und blauen Ränder bei dem stereoskopischen Relief sich kreuzend neben einander legen, ebenso die weifsen und schwarzen; so wie blaue und rothe Flächen in einer violetten Mischung zusammentreten, so weifse und schwarze in einer grauen. Der Glanz, den die Farben bei ihrer stereoskopischen Combination annehmen, tritt in noch viel höherem Grade bei Weifs und Schwarz hervor. Er ist so entschieden, dafs einige, denen ich diese Versuche zeigte, ihn mit Bleiglanz oder dem des Zinns verglichen, obgleich die weifsen und schwarzen Flächen selbst vollkommen matt waren. Nach der oben gegebenen Ableitung des Glanzes mufs aber die eine Fläche vor der andern erscheinen, die Sehweite also für sie verschieden sein. Durch directe Versuche habe ich dies bei Schwarz und Weifs nicht ermitteln können, und es geht eben daraus hervor, dafs die hier befolgte experimentelle Methode feinere Unterschiede zu er-

kennen gestattet, als die unmittelbaren Anschauungen. Da nun Schwarz und Weifs sich nur quantitativ unterscheiden als gröfstmöglichste Unterschiede der Helligkeit, so ist das Analogon zu den früheren Versuchen mit farbigen Beleuchtungen, (bei welchen in blauer Beleuchtung Gegenstände, um deutlich gesehen zu werden, näher gestellt werden müssen, als in rother) das Betrachten der Gegenstände mit blofsen Augen in verschiedenen Zuständen der Helligkeit. Die Pupille erweitert sich im Dunkel und zieht sich bei wachsender Helligkeit zusammen, die Pupille ist aber auch kleiner bei dem Betrachten naher Gegenstände, als wenn man einen entfernten scharf beobachtet. Ein dunkler Gegenstand wird also unter ähnlichen äufserlich sichtbaren Veränderungen des Auges gesehen wie ein fernerer, ein weifser wie ein näherer. In der Entfernung des deutlichen Sehens erscheint durch das violette Glas, welches die Enden des Spectrums hindurchläfst aber seine Mitte verlöscht, eine Lichtflamme, ohne Saum violett, d. h. die rothe Flamme so grofs wie die blaue. Ebenso erscheint in der Entfernung des deutlichen Sehens ein weifser Gegenstand so grofs wie ein schwarzer. In gröfserer Entfernung umsäumt ein blauer Rand die rothe Flamme, d. h. die blaue Flamme erscheint gröfser als die rothe. Ebenso erscheint der weifse Kreis auf schwarzem Grund jenseits der Weite des deutlichen Sehens gröfser, als der schwarze auf weifsem Grund. Die Erscheinungen der Irradiation sind also durch eine Kette experimenteller Erfahrungen mit chromatischen Erscheinungen verknüpft, die unmittelbar den Weg zu ihrer Erläuterung geben. Sie finden ihre Erledigung in dem Satze, dafs für eine gegebene Entfernung die Accommodation des Auges für weifse Gegenstände eine andere ist als für schwarze.

Daraus, dafs auch bei monochromatischer Beleuchtung die Erscheinungen der Irradiation wahrgenommen werden, zieht Plateau gegen Arago den Schlufs: *que s'il faut admettre l'existence de l'aberration de réfrangibilité dans l'oeil on doit attribuer l'irradiation à une autre cause, et que l'effet de l'aberration doit être consideré comme entièrement masqué dans les circonstances ordinaires par la bande d'irradiation.* Kommt der Unterschied von Weifs und Schwarz auf den eines Helleren

und Dunkleren zurück, so versteht sich von selbst, dafs, was für die Totalität aller Farben gilt, auch auf jede einzelne monochromatische Farbe seine Anwendung finden mufs. Da nun aber Weifs und Schwarz sich in allen erörterten Versuchen genau wie zwei verschieden brechbare Farben verhalten, so kann man, um von sämmtlichen hier zur Sprache gekommenen Erscheinungen sich Rechenschaft zu geben, folgenden Satz aussprechen: Die Accommodation des Auges ändert sich, wenn es dieselbe Farbe in verschiedener Intensität sieht in derselben Weise, als wenn es verschiedene Farben von gleicher Intensität betrachtet, und zwar verhält sich das Hellere zum Dunkleren, wie eine mehr brechbare Farbe zu einer weniger brechbaren.

Aus den erläuterten Thatsachen folgen einige praktische Regeln dafür, wie man Drucke einzurichten habe, um für das Auge am angemessensten bei dem Lesen derselben zu sein. Es ist unzweckmäfsig, wie es jetzt so häufig geschieht, in einen mit schwarzen Lettern auf weifsem Papier gedruckten Text Figuren einzufügen, welche weifs auf schwarzem Grund ausgeführt sind. Die dem Auge passendste Schrift würde blaue Lettern auf weifsem Grund sein oder schwarze Lettern auf einem nach dem rothen Ende des Spectrum hin liegenden, vielleicht einem in das Orange ziehenden Gelb. Dafs ein im Alter weitsichtig werdender die Convexbrille zuerst bei dem Lesen gebraucht, hat nicht allein seinen Grund in der Kleinheit der Schrift, sondern auch in dem Verhalten des schwarzen Pigments und der weifsen Grundlage zum Auge. Schwarze Lettern, welche die Schrift als stark hervorspringend perspectivisch darstellen, sind besonders unzweckmäfsig, da das Auge ein Zurücktreten derselben gegen die Grundlage verlangt nicht ein Hervortreten vor dieselbe.

Das Wesentliche aller bisher besprochener Versuche über das Binocularsehen der Farben beruht darauf, dafs ich farbige Linien betrachtet habe statt farbiger Flächen. So wie die prismatischen Erscheinungen nur klar wurden, als man kleine Oeffnungen an die Stelle grofser setzte, aber nachdem das Spectrum einer engen Spalte erörtert, sich leicht ableiten liefs, was in weiten Spalten erfolgen werde, so erläutern sich in diesem Gebiet auch

jetzt, aber erst jetzt, früher bei dem binocularen Betrachten verschieden gefärbter Flächen beobachtete Erscheinungen. Ueber den Vortheil linearer Dimensionen daher noch einige Beispiele.

Durch ein violettes Glas erscheint, wie oben bemerkt wurde, in der Weite des deutlichen Sehens eine Flamme violett, innerhalb derselben eine blaue Flamme in einer rothen, jenseits derselben eine rothe in einer blauen. Viel schärfer und entscheidender sieht man diese Erscheinungen, besonders die erstere, wenn man durch das Glas nach einer von einer hellen Flamme beleuchteten Diffractionsschneide blickt.

Aufserhalb der Weite des deutlichen Sehens erscheint ein Mikrometer von schwarzen Linien auf weifsem Grund wie ein grauer, eins von weifsen Linien auf schwarzem Grund wie ein heller Fleck. Betrachtet man das letztere, d. h. eine Reihe paralleler weifser Linien auf schwarzem Grund, durch ein blaues Glas und geht mit dem Auge so weit zurück, bis das Gitter durch das Zusammenlaufen der Linien als Fleck erscheint, so sieht man es durch ein rothes Glas noch vollkommen als Gitter, es wird bei erheblich gröfserer Entfernung erst ein Fleck. Auf diese Weise sieht man äufserst leicht, dafs die Sehweite für rothes Licht erheblich gröfser ist, als für blaues. Dafs die für weifses Licht ebenfalls gröfser als die für blaues, ist eben so deutlich zu sehen. Da es schwer ist, verschiedene Pigmente von so gleicher Intensität zu wählen, dafs durch ihre binoculare Verbindung Glanz entsteht, weifse und schwarze Flächen diesen aber entschieden geben, so kann man auf folgende Weise farbigen Glanz leicht erhalten. Man verbindet im Stereoskop eine Zeichnung von weifsen Linien auf schwarzem Grund mit einer andern von schwarzen Linien auf weifsem Grund und betrachtet sie durch ein vor beide Augen gehaltenes farbiges Glas. Bei einem Rubinglas und heller Beleuchtung erscheint das Relief wie von polirtem Kupfer. Man kann daraus schliefsen, dafs die für Irradiation und Glanz früher erhaltenen Resultate für jede beliebige farbige Beleuchtung gültig sind.

Der Versuch von Scherfer, durch zwei kleine dicht neben einander liegende Oeffnungen einen schmalen Gegenstand in der Weite des deutlichen Sehens einfach, diesseits derselben doppelt

zu sehen, gelingt für rothe und blaue Strahlen bei verschiedenen Entfernungen, für erstere bei gröfserer, für letztere bei geringerer Entfernung. Am besten ist es, als Object eine stark beleuchtete Diffractionsschneide anzuwenden, welche man nach einander mit einem rothen und blauen Glase verdeckt. Für weifses Licht liegt die Entfernung zwischen beiden Grenzen. Man kann die farbigen Gläser auch unmittelbar vor das Auge halten, so dafs die kleinen Oeffnungen sich jenseits des Glases befinden.

## 6. Flatternde Herzen.

Und so möge denn hier eine von der bisherigen abweichende Erklärung der flatternden Herzen ihre Stelle finden. Dafs ein grünes Bild auf rothem Grund rasch hin und her bewegt auf dem Grunde zu schwanken scheint, und dafs diese Täuschung vorzugsweise im indirecten Sehen stattfindet, könnte zu der Vorstellung führen, dafs es sich hier um complementare Farben handelt. Aber schon Wheatstone hat gezeigt, dafs ein rothes Herz auf blauem Grund, oder ein blaues auf rothem lebhafter sich bewegt, es ist also ein Phänomen der verschiedenen Brechung. Nun erscheint aber, wie Brewster zuerst an geognostischen Charten bemerkt hat, blau und roth nicht in einer Ebene, aus Gründen, die durch meine früheren stereoskopischen Versuche jetzt vollkommen erhellen. Bewege ich nun das Blatt in seiner Ebene, so beschreibt das Herz und der Grund gleichgrofse Tangenten an Kreisen, deren Radien ich verschieden setze. Die Winkelgeschwindigkeit des einen erscheint daher anders als die des andern, beide Objecte, Bild und Grund, scheinen sich daher über einander zu verschieben. Dabei wird natürlich vorausgesetzt, dafs auch der Grund begrenzt sei, da, wenn er als ein unbegrenzter erscheint, seine Bewegung in seiner eigenen Ebene nicht wahrgenommen wird. Dafs bei seitlicher Betrachtung das Phänomen deutlicher hervortritt als bei senkrechter, hängt wahrscheinlich damit zusammen, dafs die in Beziehung auf das Auge hier geltend gemachten Unterschiede der Farben dann noch entschie[redacted] ich sehr schief zur

Seite blicke, in einem dunklen Zimmer eine enge von aufsen hell beleuchtete Spalte mitunter als Spectrum, welches ich nie bei senkrechter Betrachtung wahrgenommen habe. Aufserdem ist aus leicht ersichtlichen Gründen die Differenz beider Bewegungen auf einer eingebildeten Parallaxe beruhend bei seitlicher Betrachtung gröfser, so wie eine parallel mit sich hin und her bewegter den Augen zugekehrter Stab seitlich betrachtet mehr zu schwanken scheint als dann, wenn seine Bewegung um die Halbirungslinie der Sehelinien beider Augen geschieht.

Dafs wir das mit beiden Augen Gesehene auch bei dem Doppeltsehen auf eine bestimmte Entfernung projiciren, geht aus folgendem Versuch hervor. Ich hatte früher die Beobachtung gemacht, ohne sie erklären zu können, dafs ich mitunter bei dem Doppeltsehen einer geraden Linie das eine Bild als eine gerade Linie, das andere als eine gebrochene oder gekrümmte sah. Ohne behaupten zu wollen, dafs dies immer aus denselben Gründen erfolgt, kann ich doch für besondere Fälle den Grund nachweisen. Ich legte einen Bogen Papier, auf dem ich eine gerade Linie gezeichnet, auf einen Tisch und betrachtete sie durch Doppelsehen als zwei gerade Linien. Ich krümmte nun den Bogen so, dafs die Projection der geraden Linie auf dem Tisch für das eine Auge eine gerade Linie blieb, für das andere eine gekrümmte Linie wurde. Nun sah ich die eine Linie gerade, die andere gekrümmt.

## 7. Einflufs der Helligkeit einer weifsen Beleuchtung auf die relative Intensität verschiedener Farben [1]).

Dafs Gelb und Roth dem Lichte näher stehen, Blau dem Dunkel, ist eine Grundanschauung, die sich durch die Farbenvorstellungen des Alterthums hindurchzieht, die sich auch in unserer Sprache durch die Bezeichnung brennendes Roth, schreiendes Gelb im Gegensatz zu tiefem Blau geltend macht. Photometrische Versuche bestätigen dies, denn um auf einem Farben-

[1]) Berichte der Berl. Akad. 1851 p. 69.

kreisel ein in der Mitte stehendes Violett oder Grün zu erhalten, mufs man den rothen oder gelben Ausschnitt nach Plateaus Versuchen viermal schmaler machen als den blauen. Einen noch überzeugendern Beweis erhält man, wenn man die von Fechner schwarz auf weifs aufgetragene Spirale in den beiden Farben ausführt, deren Mischung man prüfen will. Sucht man bei der Rotation die Stelle auf, wo in dem allmähligen Uebergang von Roth durch Violett zu Blau, oder von Blau durch Grün zu Gelb die beiden zusammenwirkenden Farben einander genau das Gleichgewicht halten, so findet man diese Stelle nie in der Mitte des Halbmessers der Scheibe, sondern stets nach der Seite des Blauen hin.

Mit diesen bekannten Erscheinungen steht eine andre scheinbar in vollkommnem Widerspruch, von der ich mich nur erinnere, dafs sie indirect in der Optik zur Sprache gekommen ist. Es ist mir oft aufgefallen, dafs wenn ich bei einbrechender Dunkelheit eine Gemäldegallerie verliefs, und einen letzten flüchtigen Blick auf die Bilder warf, rothe Gewänder mir schon vollkommen verdunkelt erschienen, während ein blaues noch in voller Kraft der Farbe hervortrat. Ausübenden Künstlern ist in ihren Ateliers die Erscheinung vollkommen bekannt, ich habe wenigstens bei Befragen derselben stets diese Beobachtung bestätigen hören. Es schien mir wünschenswerth, zunächst die Thatsache an homogenen Farben zu prüfen, um sie unabhängig von der Unbestimmtheit zu machen, welche stets bei chromatischen Versuchen mit Pigmenten obwaltet.

Wir haben oben gesehen, dafs wenn man vor das rechte Auge ein farbiges Glas hält, vor das linke ein andersfarbiges, und nun im Stereoskop die für das rechte und für das linke Auge entworfene Projection eines Körpers mit weifsen Linien auf schwarzen Grund ausgeführt beobachtet, das Relief in der Mischungsfarbe erscheint, während alle Kanten aus getrennten einander der Länge nach berührenden farbigen Linien bestehen. Bei der Anwendung eines Glases, welches die blauen homogenen Strahlen durchläfst, und eines andern, welches dasselbe für die rothen thut, ist die Erscheinung am schönsten. Das von mir angewendete blaue Glas macht bei hellem Tage den Eindruck

eines viel dunklern, da es das rothe um mehr als das zehnfache an Dicke übertrifft. Bei zunehmender Dämmerung verschwinden aber die rothen Kanten immer mehr, zuletzt sind sie kaum noch sichtbar, doch noch so weit mitwirkend, dafs das Relief erscheint. Endlich aber verschwinden sie vollständig, so dafs man statt des Reliefs nur die in blauen Linien ausgeführte Projection sieht, welche der Ansicht des Auges entspricht, welches durch das blaue Glas sieht. Legt man nun zwei rothe Gläser vor die Oeffnung des Stereoskops, so sieht man gar nichts, während bei zwei blauen Gläsern das Relief deutlich in jetziger Jahreszeit noch eine Viertelstunde wahrgenommen wird. Damit ist die Thatsache selbst streng erwiesen; wie erklärt sich nun, dafs die bei heller Beleuchtung hellere Farbe in der Dämmerung früher verschwindet als die weniger helle?

Bekanntlich gelangen nur unmittelbare Eindrücke auf die Sinnesorgane zu unserm Bewufstsein, die schwächsten auf dieselben wirkenden Bewegungen werden nicht mehr einzeln empfunden, aber dann, wenn sie sich schnell gleichmäfsig wiederholen. Daraus ist deutlich, warum, um vernommen zu werden, die Saiten des Contrebasses weiter schwingen müssen, als die der Violine, da bei der geringen Anzahl der Schwingungen sie energischer sein müssen, warum wir in höherem Tone sprechen, wenn wir ohne grofse Anstrengung gehört werden wollen, warum, wenn die tiefe durch das Sprachrohr verstärkte Stimme des Seemanns im Sturme verhallt, noch der schrillende Ton der Botspfeife durch das Brausen der Wogen und das Geheul des Windes hindurchdringt. Savart hat vermittelst der Speichensirene gezeigt, dafs die Grenze der Wahrnehmbarkeit der Töne nach der Tiefe hin durch die Stärke der Stöfse erweitert werden kann. Die vollkommene Gleichartigkeit der Schwingungen bewirkt das Summiren der Eindrücke am vollständigsten, indem die durch ungleiche Schwingungsdauer entstehenden Interferenzen dann wegfallen. Diese Gleichförmigkeit bewirkt bei dem Tone die Reinheit, bei der Farbe die Homogenität. Das Blau verhält sich aber zum Roth wie ein höherer Ton zu einem tiefern, bei dem erstern sind die Schwingungen der Netzhaut häufiger als bei dem letztern, wie die des Trommelfells zahlreicher bei höherem

Tone als bei tieferem. Da nun bei schwächer werdendem Tone die Grenze der Wahrnehmbarkeit tiefer Töne abnimmt, so ist es vollkommen dem entsprechend, dafs bei abnehmender Helligkeit die Grenze der Wahrnehmung des Rothen sich ebenfalls verengert. Die rothe Farbe wird daher bei schwacher Beleuchtung nicht mehr gesehen werden, während die grofse Anzahl der Schwingungen bei blauem Licht dessen Wahrnehmbarkeit länger erhält.

Auf diese Weise erkläre ich mir die wunderbare Erscheinung, über welche sich aber merkwürdiger Weise noch Niemand gewundert hat, dafs bei dem schwachen Sternenlicht sich das Blau des Himmels noch deutlich geltend macht.

Hiermit hängt die Erscheinung zusammen, dafs ein durch eine enge Spalte entwickeltes prismatisches Spectrum bei intensivem Licht die Farben nach dem rothen Ende hin verhältnifsmäfsig lebhafter entwickelt als nach dem violetten. Besonders deutlich sieht man dies bei dichromatischen Medien, welche die Enden des Spectrums hindurchlassen, indem sie seine Mitte verlöschen, wenn man die Intensität der getrennten Farben bei verschiedener Helligkeit der Beleuchtung der Spalte mit einander vergleicht. Aus demselben Grunde zieht ein violettes Glas bei zunehmender Dämmerung immer mehr ins Blau. Der dunkle Raum jenseits des rothen Endes des vollständigen Spectrums, in welchem die Wärme ihr Maximum erreicht, würde wahrscheinlich vollkommen sichtbar werden, wenn man die Intensität des Sonnenlichtes durch Concentration bedeutend steigerte. Es wäre dies der Savart'sche Versuch in Beziehung auf die Grenzen der Sichtbarkeit tiefer Farben, wenn ich mich des Ausdrucks bedienen darf. Wahrscheinlich gehören hierher die Versuche von Brewster über die Frauenhofer'schen Linien in diesem Theile des Spectrums (*Report of the Brit. Assoc.* 1847 p. 33), obgleich dort der Grund des Erscheinens nur der Beseitigung der sphärischen Aberration, nicht der Lichtstärke des angewendeten Fernrohrs zugeschrieben scheint. In ähnlicher Weise erweitert sich auch mit Steigerung der Helligkeit die Wirkung des Lichtes auf eine jodirte Silberplatte jenseits des violetten Endes.

Nach Beendigung der im Vorhergehenden beschriebenen Ver-

suche fand ich in der Abhandlung von Seebeck über den bei manchen Personen vorkommenden Mangel an Farbensinn (Pogg. Ann. 42 p. 222) folgende Stelle: »in der Dämmerung verschwinden bekanntlich die wenigst brechbaren Strahlen zuerst aus dem Lichte der Atmosphäre, wodurch die bekannten Aenderungen in dem Ansehn der Farben entstehn.« Seebeck erklärt daher diese Erscheinungen aus einer objectiven Veränderung der Farbe der Beleuchtung. Dies geht deutlich daraus hervor, dafs er (p. 224) bemerkt: »Von dem Dr. G. wird angeführt, dafs er bei einiger Dunkelheit besser sehe, als andre Personen, die ihn bei Tage an Gesichtsschärfe übertreffen. Ich vermuthe, dafs dies von der Dämmerung zu verstehen ist, indem hier, wo die wenigst brechbaren Strahlen zuerst verschwinden, das Abnehmen des Tageslichts den Augen der zweiten Klasse weniger empfindlich sein mufs, als denen der ersten Klasse und dem gewöhnlichen Auge.«

Was nun die bekannte Thatsache eines objectiven Fehlens der am wenigsten brechbaren Strahlen betrifft, so ist es auffallend, dafs ich sie in keiner Untersuchung über Dämmerung und über Farbe des Himmels, die neuesten nicht ausgenommen, erwähnt finde. Seebeck sagt selbst, dafs das Himmelblau dem Grau in der Dämmerung ziemlich ähnlich wird. Hassenfratz [1]) fand die Länge des Spectrums bei hohem Sonnenstande 185 Millimeter, bei Sonnenuntergang nur 70 und dabei fehlten die Strahlen auf der blauen Seite so sehr, dafs das ganze Farbenbild nur aus Roth, Orange und Grün bestand, und Kämtz erklärt [2]) dies dadurch, dafs die blauen Strahlen auf dem langen Wege durch die Atmosphäre verloren gegangen wären. Vorausgesetzt nun auch, dafs blaues Licht in der Dämmerung überwiege, so würde dies doch nicht stattfinden können bei einer vollkommen gleichartigen weifsen Bedeckung des Himmels, wo nach allen Theorien das Licht farblos reflectirt wird. Nun habe ich aber meine Versuche an Tagen angestellt, wo der Himmel so gleichförmig bedeckt war, dafs mit dem empfindlichsten Apparate keine Spur von Polarisation des Himmelslichtes sich zeigte, ja an Ta-

[1]) Annal. de Chim. 66. p. 60.
[2]) Meteorologie 3. p. 42.

gen, wo ein dichter Nebel die Luft gleichartig erfüllte. Um aber jeden möglichen Zweifel zu beseitigen, habe ich die Versuche um Mittag in einem künstlich verfinsterten Zimmer wiederholt.

Tritt man unmittelbar aus einem hell erleuchteten Zimmer in ein stark verdunkeltes, und nähert sich der Stelle, wo das Licht eintritt, so weit, dafs man das Blau erkennt, so erscheint zunächst das Roth lebhafter. Das Auge verlangt nämlich dann noch die Helligkeit, bei welcher das Roth überwiegt über das Blau. Erst nach längerem Aufenthalt im Dunkeln ist die Netzhaut so empfindlich, wie in der starken Dämmerung. Tritt man nun so weit zurück von der Stelle, wo das Licht einfällt, dafs das Blau noch deutlich erscheint, so ist das Roth vollständig verschwunden. Hiebei ist es aber nicht möglich, das Wheatston'sche Stereoskop mit Sicherheit anzuwenden, da es äufserst schwierig ist, den beiden Flächen genau gleiche Beleuchtung zu geben. Am besten erhält man die beschriebene Thatsache mit einem Prismenstereoskop, oder wenn man nach einander eine mit weifsen Strichen auf schwarzem Grund ausgeführte unverändert liegende Zeichnung zuerst durch das blaue, dann durch das rothe Glas betrachtet.

Hierher gehört auch die merkwürdige Thatsache, dafs, unter vielen, denen ich gleichzeitig bei hellem Tage das Relief im Stereoskop mit blauen und rothen Kanten durch die verschiedenfarbigen Gläser zeigte, einer erklärte, dafs er nur die Zeichnung mit blauen Linien, nicht das Relief sähe, da er durch das rothe Glas die Zeichnung gar nicht wahrnehme. Die Augen dieses Individuums verhielten sich also bei hellem Sonnenschein wie die normalen Augen im schwachen Dämmerlicht.

Wenn aus unsern bisherigen Versuchen folgt, dafs das bei heller Beleuchtung lebhaftere Roth gegen das schwächere Blau zurücktritt, wenn die Dunkelheit zunimmt, so ist es nicht unmöglich, dafs in voller Dunkelheit jenseits des violetten Endes des Spectrums noch schwächere Schwingungen stattfinden, die, wenn sie auch nicht von dem Auge empfunden werden, doch eine jodirte Silberplatte afficiren. Durch die Dauer und die grofse Anzahl der Schwingungen würde sich erklären lassen, dafs eine Wirkung auf einer Platte hervortritt, die auf der Netzhaut nicht

empfunden wird, weil wir das bewegliche Auge nicht so lange und so stetig der summirenden Wirkung dieser kleinen Schwingungen aussetzen können als die ruhende Silberplatte. Moser sagt ausdrücklich, dafs das unsichtbare Licht zu dem sichtbaren sich verhalte, wie das violette zum rothen und es scheint mir nach dem hier Erörterten nicht einmal nöthig anzunehmen, dafs diese Schwingungen von der Nervenhaut nicht empfunden werden, weil sie von den Substanzen, welche vor ihr liegen, zurückgehalten werden [1]). Senden alle Körper Licht aus, es mag nun die Netzhaut afficiren oder nicht, so wird eine Beleuchtung der letztern Klasse von Körpern durch eine der erstern nur störend wirken, denn wir verlangen dann von der Platte, dafs sie gleichzeitig zwei Bilder darstelle, welches natürlich der Deutlichkeit Eintrag thun wird.

## 8. Mangelnder Farbensinn.

Seebeck hat gezeigt, dafs die zweite Klasse der mit mangelndem Farbensinn behafteten Individuen bei hellem Licht ohngefähr die Erscheinungen sieht, welche ein farbengesundes Auge in der Dämmerung wahrnimmt. Da die objective Erklärung nun wegfällt, so bleibt nur eine subjective, d. h. die Annahme, dafs die Netzhaut des gesunden Auges bei schwacher Beleuchtung dem Zustande jenes krankhaften sich nähert.

Bei dem Interesse, welches die Arbeit von Seebeck bei ihrem Erscheinen in mir erregte, war es mir wünschenswerth, eine vollständige Anschauung dieser Eigenthümlichkeit zu erhalten. Seebeck hatte daher die Güte, mir ein Exemplar derselben zu geben, in welchem die verschiednen farbigen Papiere, welche die Individuen als gleich ausgesucht hatten, in viele Reihen je zwei neben einander geklebt sind. Nun stellte ich mir die Frage, wenn ein Individuum ein lebhaftes Roth und Grün als vollkommen gleich sieht, sieht es vielleicht das, was ein gesundes Auge als Mittelfarbe aus beiden wahrnimmt. Wie aber fällt diese Mittelfarbe aus? Dies erhält man sehr schön mittelst

[1]) Ueber das Licht p. 18.

eines Prismenstereoskops. Bringt man die farbigen Papiere zum Decken, so erscheinen die vorher so verschiedenen Papiere paarweise vollkommen gleichartig und in der Regel grau oder als eine Schmutzfarbe. Auf diese Weise würde sich erklären, wie eins der Individuen das reine Roth nicht besser als durch die Farbe eines Esels zu bezeichnen wufste. Versuche mit wahren complementaren Farben wären besonders interessant.

Schliefslich mag hier noch die Beobachtung eine Stelle finden, dafs Individuen, welche bestimmte Farben nicht zu unterscheiden vermögen, dennoch die für sie gleichen, aber für ein gesundes Auge verschiedenen Farben aus ungleicher Entfernung deutlich sehen. Ich habe mit ihnen die Versuche mit dem Deutlichsehen eines weifsen schmalen Gegenstandes durch ein rothes und blaues Glas mit demselben Erfolg angestellt, als mit denen, welche die Farben vollkommen unterschieden.

## II. Stereoskopische Apparate.

Bei der Anstellung der eben beschriebenen Versuche bin ich auf die Construction mehrerer Stereoskope geführt worden, welche auf einer Eigenschaft des gleichschenklichen Prismas beruht, wenn der Winkel an der Spitze desselben kein sehr spitzer ist. Eine Combination zweier solcher Prismen ist, so viel mir bekannt worden ist, noch nie angewendet worden, und ich habe daher derselben den Namen Reversionsprisma gegeben, weil ein durch diese Combination gesehener Gegenstand nicht wie ein Spiegelbild erscheint, sondern unverändert nur nach der Stellung der Prismen gegeneinander in beliebig gegen den gesehenen Gegenstand geneigter Lage, daher auch aufrecht und vollständig umgekehrt.

### 1. Eigenschaften des directen Spiegelprismas.

Bezeichnet (Fig. 1) *prs* ein gleichschenkliges hier rechtwinkliges Prisma, *ad, bd, cd* in der lothrechten Ebene unter

verschiedenen Winkeln auf die Cathetenfläche $pr$ so auffallende Strahlen, dafs sie nach der Brechung in $d$ respective in $e, g, i$ auf der Hypotenusenfläche total reflectirt werden, so werden dieselben nach einer zweiten Brechung in den Punkten $f, h, k$ der Cathetenfläche $rs$ austreten, und gegen diese daher auch unter einander ebenso geneigt sein, als bei ihrem Eintritt gegen $pr$ und unter einander. Ein im Raum $\alpha\gamma$ befindliches Auge wird daher den Gegenstand durch das Prisma hindurch wie von $d$ aus sehen, nur in umgekehrter Lage und wie ein Spiegelbild verändert.

Da bei dem Eintritt parallele Strahlen es auch bei ihrem Austritt sind, so ist die Bedingung der Achromasie in aller Strenge erfüllt.

Ein in $a$ befindlicher entfernter kleiner Kreis wird, da parallel der Hypotenusenfläche auffallende Strahlen auch parallel derselben austreten, für ein in $\alpha$ befindliches Auge an derselben Stelle durch das Prisma gesehen erscheinen, als mit bloſsem Auge ohne Prisma.

Hält man nun das Prisma so vor das rechte Auge, dafs die Hypotenusenfläche $pu$ lothrecht steht, die Dreiecksfläche $pts$ horizontal, so wird das in $\alpha$ befindliche Auge in der Richtung $\alpha f$ das Spiegelbild des betrachteten Gegenstandes sehen, statt des Gegenstandes.

Betrachtet man daher mit einem solchen Prisma einen in Typen ausgeführten Drucksatz, so erscheint er wie eine wirkliche Schrift. Ebenso erscheint eine auf einen lithographischen Stein entworfene Zeichnung wie der spätere wirkliche Abdruck. Betrachtet man sich durch ein solches Prisma im Spiegel, so sieht man sich nicht mehr als Spiegelbild, sondern durch doppelte Umkehrung, wie man andern erscheint.

Da unter $ad$ aus dem Raum $M$ auf $d$ auffallende Strahlen bei dem Austritt aus $rs$ in den Raum $N$ gebrochen werden, so haben wir in dem so angewendeten Prisma einen Spiegel, in welchem wir auch hinter dem Spiegel befindliche Gegenstände sehen können.

Dreht man das Prisma so um die Kante $us$, dafs der in der Figur mit dem Einfallsloth auf $pr$ einen Winkel von 45°

machende Strahl *ad* seine Neigung gegen das Einfallsloth verkleinert, so wird dasselbe für den austretenden stattfinden. Daraus folgt, dafs das durch das Prisma gesehene Bild mit doppelter Winkelgeschwindigkeit sich bewegt, als das Prisma; wird *ad* lothrecht auf die Eintrittsfläche, so ist auch der austretende Strahl es auf der Austrittsfläche. In diesem Falle verwandelt sich das Spiegelprisma in das gewöhnliche Ablesungsprisma.

Blickt nun das rechte Auge durch das Prisma, das andre neben der Hypotenusenfläche vorbei direct nach dem Gegenstande, so wird durch Drehung des Prismas es leicht sein, das prismatische Spiegelbild mit dem direct gesehenen zum Decken zu bringen. Ebenso kann das Spiegelbild auch auf einen andern direct gesehenen Gegenstand projicirt werden.

Dasselbe wird mit den zwei Spiegelbildern erhalten werden, wenn jedes Auge für sich durch ein solches Prisma blickt, diese Spiegelbilder mögen nun einem Gegenstande oder zweien angehören.

Da nun die stereoskopischen Erscheinungen darauf beruhen, dafs man glaubt, die für die beiden Augen entworfenen Ansichten gingen von derselben Stelle des Raumes aus, so sieht man unmittelbar ein, dafs man vermittelst des Spiegelprismas diese Bedingung leicht erfüllen kann und zwar auf eine doppelte Weise. Unterscheidet sich nämlich die Ansicht des Körpers vermittelst des rechten Auges von der vermittelst des linken nur so wie der Anblick des Gegenstandes von der seines Spiegelbildes, wie z. B. bei einer geraden, ganzen oder abgekürzten Pyramide, einem Kegel, einem Krystalle des regulären Systems u. s. f., so kann man mit einer Zeichnung ausreichen, die man mit dem einen blofsen Auge betrachtet und mit dem andern durch das Prisma blickenden. Solche Zeichnungen können einfache Umkehrungen genannt werden im Gegensatz zu denen, bei welchen die auf die Verbindungslinie beider Augen lothrecht durch die Mitte des Körpers gelegte Ebene diesen nicht symmetrisch theilt. Bei den letztern bringt man die Spiegelbilder beider Ansichten durch zwei Prismen zum Decken.

Fig. 2 und Fig. 3 enthalten diese beiden Apparate, wie sie vom Herrn Oertling für mich ausgeführt worden sind.

## 2. Prismenstereoskop, bestehend aus einem Prisma und einer für ein Auge entworfenen Zeichnung, Fig. 2.

An einem auf einem horizontalen Brett befestigten senkrechten 17″ hohen Ständer *ab* ist ein 6″ breiter Tisch verschieblich, bestimmt die stereoskopische Zeichnung darauf zu legen. Der Querarm *ab* trägt bei *f* das rechtwinklige in einer lothrechten Ebene drehbare Prisma, dessen Hypotenuse $1\frac{1}{2}$″ lang, und ist bei *g* durch ein rundes Loch durchbohrt, durch welches man mit bloſsem Auge blickt. In der Mitte zwischen beiden ist der horizontale Arm rund ausgeschnitten, um für die Nase Raum zu gewähren. Ueber *f* und *g* befinden sich zwei in der horizontalen Ebene drehbare Ringe, in welche farbige Gläser eingeschraubt werden, oder wenn man eine Vergröſserung wünscht, dem entsprechende Convexlinsen. Dreht man die Zeichnung in ihrer Ebene um 180°, so verwandelt sich das convexe Relief in ein concaves, und umgekehrt. Ist der Gegenstand als durchsichtig gedacht, bietet er dem Anblick daher eine äuſsere convexe und eine innere concave Fläche, so vertauscht sich bei dieser Drehung die Vorderfläche mit der Hinterfläche. Die hierbei anzuwendenden Bilder müssen aber eben nur solche sein, welche oben »einfache Umkehrungen« genannt wurden. Kehrt man das Instrument so um, daſs das Prisma vor das rechte Auge zu stehen kommt, statt vor das linke, so bleibt der Anblick des Körpers derselbe, denn man hat ja, indem man die Ansichten für beide Augen vertauschte, jede zugleich in ihrer Ebene um 180° gedreht. Zeichnungen von durchsichtig gedachten Körpern müssen natürlich so gelegt werden, daſs die Flächen der convexen Vorderfläche gröſser erscheinen, als die der concaven Hinterfläche, weil diese als entfernter vorgestellt werden.

## 3. Prismenstereoskop, bestehend aus zwei Prismen und zwei Zeichnungen.

Es ist Fig. 3 abgebildet. Die beiden in einer lothrechten Ebene drehbaren Prismen mit einander zugekehrten Hypotenusen-

flächen sind hier an einem eben so hohen Ständer als bei dem vorigen befestigt, der sich oben gabelförmig öffnet. Der Tisch ist 10″ breit, da er zwei Zeichnungen aufzunehmen bestimmt ist. Die farbigen Gläser befinden sich über den beiden Prismen ebenfalls in horizontaler Ebene drehbar. Man kann dieses Stereoskop auch wie das vorige brauchen, indem man mit dem linken Auge durch das rechts stehende Prisma blickt und mit dem rechten frei vorbei, oder mit dem rechten Auge durch das links stehende Prisma und mit dem linken Auge frei vorbei. Dieselbe Zeichnung giebt in dem einen Falle ein convexes, in dem andern ein concaves Relief.

Dieses Stereoskop ist, wenn man gleichzeitig durch beide Prismen sieht, für alle Projectionen brauchbar, sie mögen nun einfache Umkehrungen von einander sein oder nicht. Doch tritt natürlich bei der Anwendung nur eines Prismas die Beschränkung auf einfache Projectionen ein.

Die hier beschriebenen beiden Stereoskope bieten den Vortheil dar, dafs man Zeichnungen von beliebiger Gröfse anwenden kann, ja mir ist mit dem ersten der merkwürdige Versuch gelungen, durch stereoskopische Combination zweier Körper eine Ebene zu sehen. Ich betrachtete bei Beleuchtung einer Lampe die sechsseitige Säule eines Holzmodells von Zinkvitriol mit dem blofsen linken Auge und projicirte darauf das mit dem rechten Auge durch das Prisma gesehene Bild desselben Modells. Hierbei glich sich die verschiedene Beleuchtung der beiden Seitenflächen gegenseitig so aus, dafs sie mit der Vorderfläche in einer Ebene zu liegen schienen.

Bei Bildern, welche mit weifsen Linien auf schwarzen Grund gezeichnet sind, treten bei dem Wheatstone'schen Stereoskop die durch Spiegelung von der unbelegten Vorderfläche des Glases entstehenden schwächern Nebenbilder oft sichtbar neben dem von der belegten Hinterfläche entstehenden Hauptbilde hervor. Die Beseitigung derselben war durchaus nothwendig, um sicher zu sein, dafs das Nebeneinanderlegen der farbigen Kanten bei dem Anblick des Reliefs im Stereoskop nicht diesen Nebenbildern zuzuschreiben sei. Es mufste daher totale oder metallische Reflexion angewendet werden. Aufserdem kann der Verdacht ent-

stehen, dafs bei einer stereoskopischen Erscheinung, in welcher die Conturen sich nicht vollständig decken, dies einer nicht vollkommen richtig ausgeführten Zeichnung der Projection zuzuschreiben sei. Dies führte zu dem Wunsche, nur eine Zeichnung anzuwenden.

In dem von Brewster im *Report of the Britisch Association* für 1849 pag. 6 beschriebenen Linsen-Stereoskop wird das Decken der Bilder durch zwei Halblinsen hervorgebracht, welche als Prismen von kleinem Winkel wirken, und daher in ihrer Ebene drehbar sind. Da bei diesen die Bedingung der Achromasie nicht erfüllt ist, so war dies Princip bei den von mir angestellten Untersuchungen am allerwenigsten anwendbar. Das Brewster'sche Stereoskop unterscheidet sich aufserdem von dem von mir angegebenen dadurch, dafs bei ihm die Zeichnung links liegen mufs, welche bei mir rechts liegt. Nun sind aber bei allen nach dem Brewster'schen Princip construirten, in Handel gekommenen Apparaten die beiden Projectionen, sie mögen nun Zeichnungen sein oder daguersche oder photographische Aufnahmen, im erstern Falle auf einem Blatte dargestellt, im letztern auf einer Platte befestigt, und darin liegt unmittelbar der Beweis, dafs keins dieser Daguerotype und keine der Zeichnungen mit unsymmetrischen Ansichten für einen nach dem Princip des Prismenstereoskops construirten Apparat hat bestimmt sein können.

Da das Brewster'sche Linsenstereoskop auf Brechung in Prismen von kleinem Winkel, das oben beschriebene Prismenstereoskop auf Reflexion in Prismen mit grofsem Winkel gegründet ist, so hat Moigno im Kosmos für das letztere den Namen *stereoscope à reflexion totale* vorgeschlagen, welcher bezeichnender sein mag, aber mir zu lang scheint.

## 4. Prismenstereoskop mit einem Prisma und zwei Zeichnungen.

Für Projectionen, welche nicht einfache Umkehrungen sind, müssen nothwendig zwei Zeichnungen vorhanden sein, aber es ist nicht nothwendig, zwei Prismen anzuwenden. Legt man nämlich auf den Tisch des vorigen Instruments oder des ersten

neben einander zwei unsymmetrische Zeichnungen, von welchen die eine direct für das eine Auge entworfen ist, die andre hingegen das gezeichnete Spiegelbild der für das andre Auge entworfenen, so braucht man nur die erstere mit blofsem Auge zu betrachten, die zweite durch das Spiegelprisma, um das Relief zu erhalten.

## 5. Fernrohrstereoskop mit einer Zeichnung.

Man hält vor das eine Auge ein galiläisches, vor das andre Auge ein astronomisches Fernrohr gleicher Vergröfserung und bringt bei dem Betrachten einer symmetrischen Projection beide Bilder zum Decken. Diese Methode bot sich mir zuerst dar, um stereoskopische Erscheinungen mit einer Zeichnung zu erhalten [1]).

## 6. Spiegelstereoskop für zwei Bilder mit einem Metallspiegel oder Ablesungsprisma.

Der Apparat ist Fig. 4 abgebildet. Das Fufsgestell desselben besteht aus zwei Brettern, welche schlittenartig in einander laufen, so dafs die Entfernung der beiden an ihren Enden befindlichen Ständer *ab* und *cd* verändert werden kann. Der rechts stehende Ständer trägt einen viereckigen Rahmen, in welchem die Zeichnung für das rechte Auge befindlich ist, die in einem bei *f* befindlichen unter 45° geneigten Metallspiegel von 1″ Länge betrachtet wird oder in einem entsprechenden Ablesungsprisma. Das linke Auge blickt bei *e* auf die horizontal liegende Zeichnung auf dem an dem Ständer *ab* verschieblichen Ständer. Dieser Apparat ist vorzugsweise zu den Versuchen geeignet, bei welchen man Bilder ungleicher Gröfse combinirt. Auch können die ihn anwenden, bei welchen die Sehweite beider Augen sehr verschieden ist. Nur müssen dann die Zeichnungen in einem der verschiedenen Sehweite entsprechenden Mafsstab ausgeführt werden.

[1]) Berichte der Berl. Akad. 1850 p. 152.

## 7. Stereoskop durch Doppelbrechung.

Man legt zwei Zeichnungen neben einander und betrachtet die eine durch ein vor ein Auge gehaltenes doppelbrechendes achromatisches Prisma, zugleich dieselben Zeichnungen mit blofsem Auge. Man erhält durch Combination dann statt 6 Bilder 5 und unter diesen ein körperliches. Dies gelingt aber nur schwierig.

Der Wunsch, mit einer Vorrichtung, welche vor ein Auge gehalten wird, stereoskopische Combinationen auch unsymmetrischer Projectionen zu erhalten, führte mich zuletzt zur Construction des Reversionsprisma.

## 8. Das Reversionsprisma.

Wir haben früher gesehn, dafs wenn die Hypotenusenfläche eines einfachen gleichschenkligen Spiegelprismas (Fig. 1) horizontal liegt, ein lothrechter Gegenstand lothrecht aber umgekehrt erscheint. Schneidet die Verlängerung der Hypotenusenfläche den Gegenstand in einer horizontalen Linie, so erhält man also das Bild dadurch, dafs man von allen Punkten des Gegenstandes Lothe fällt, und sie um gleich viel unter die horizontale verlängert, die Endpunkte der Lothe sind die Bilder der entsprechenden Anfangspunkte.

Eine von der horizontalen Linie in der Mitte geschnittene lothrechte Gerade deckt sich daher, durch das Prisma gesehen, in umgekehrter Lage. Bei einer um 45° geneigten Geraden steht hingegen das Bild lothrecht auf dem Gegenstand. Da nun, wenn die vorher lothrechte Linie sich bei stehenbleibendem Prisma in ihrer Ebene um 45° seitlich neigt, dies ebenso wirkt, als wenn die Linie stehen bliebe und das Prisma um die Hypotenusenkante *ps* gedreht würde, so bewegt sich auch bei dieser Drehung das Bild wie früher bei der Drehung um die Kante *us* mit doppelter Winkelgeschwindigkeit als das gedrehte Prisma.

Da nun die aus dem ersten Prisma austretenden Strahlen in Beziehung auf ein zweites Prisma als von einem Gegenstand ausgehend betrachtet werden können, der an der Stelle des Bildes

liegt, so wird eine durch zwei hinter einander liegende Prismen, deren Hypotenusenflächen irgend einen Winkel mit einander bilden, gesehene gerade Linien um das Doppelte dieses Winkels gedreht erscheinen. Ist nämlich Fig. 5 $ad$ diese Linie, $ab$ die Durchschnittslinie der verlängerten Hypotenusenfläche des ersten Prismas mit dem Gegenstand, $ac$ die Durchschnittslinie der Hypotenusenfläche des zweiten Prismas mit demselben Gegenstand, so wird $ad_1$ das Bild der Linie $ad$ sein, welches durch das erste Prisma entsteht. Die aus diesem austretenden Strahlen fallen also auf das zweite Prisma, als wenn sie von $ad_1$ ausgingen, ihr Bild nach dem Austritt aus dem zweiten Prisma wird also $ad_{11}$ sein. Der Winkel $dad_{11}$ ist aber das Doppelte von $bac$. Daraus folgt:

Liegen die Hypotenusenflächen zweier gleicher Prismen in einer Ebene, sind also ihre entsprechenden Kanten paarweise parallel, so wird der Gegenstand durch beide unverändert erscheinen, da das zweite Prisma jede lothrechte Linie von Neuem umkehrt, also die ursprüngliche Lage wieder herstellt. Wird hingegen bei stehenbleibendem ersten Prisma das zweite um 90° um seine Hypotenusenkante gedreht (Fig. 6), liegt also die Brechungsebene des zweiten horizontal, die des ersten lothrecht, so erscheint der Gegenstand vollständig umgekehrt. Das erste Prisma kehrt ihn nämlich in Beziehung auf Oben und Unten um, das zweite in Beziehung auf Rechts und Links. In der Figur ist $a$ vertical über $c$ gedacht, $b$ horizontal hinter $c$, dann liegt beim Austritt $a_1$ vertical unter $c_1$, $c_1$ horizontal hinter $b_1$. Bilden hingegen (Fig. 7) die Brechungsebenen einen spitzen Winkel miteinander, so liegt nun $c_1$ über $a_1$ und hinter $b_1$, doch weder vertical über $a_1$, noch horizontal hinter $c_1$. Da man sich nun den Effect der doppelten Spiegelung einer betrachteten Ebene denken kann als eine 180° betragende Drehung dieser Ebene zuerst um eine in ihr liegende Linie, dann um eine zweite willkürlich gegen diese geneigte, so wird die Ansicht dieser Ebene in Beziehung auf Gestalt und Gröfse dieselbe bleiben, ihre Lage aber eine schiefe geworden sein. Daraus folgt: durch zwei beliebig gegen einander aufgestellte Prismen, deren Hypotenusenkanten eine gerade Linie bilden, erscheint der Ge-

genstand unverändert an Gestalt und Gröfse, aber um einen Winkel gedreht, welcher doppelt so grofs als der ist, welchen ihre Brechungsebenen mit einander machen. Dreht man hingegen beide Prismen, in welchem Stadium der gegenseitigen Drehung sie auch gegen einander stehen, gleichzeitig so um die Hypotenusenkante, dafs ihre gegenseitige Lage dieselbe bleibt, also beide mit gleicher Geschwindigkeit in gleichem Sinne, so bleibt das Bild unverändert stehen; denn da das Bild des ersten Prisma sich mit doppelt so grofser Geschwindigkeit bewegt, als das zweite Prisma, so eilt es diesem um der Drehungswinkel vor. Ein Voreilen des Bildes ist aber einer Bewegung des zweiten Prismas in entgegengesetztem Sinn zu vergleichen, diese führt also das Bild um denselben Winkel zurück, um welchen das erste Prisma es vorführt.

## 9. Stereoskop aus einem Reversionsprisma mit zwei Bildern.

Bleiben bei der Drehung des zweiten Prismas gegen das erste die Hypotenusenkanten beider stets parallel, so wird ein durch beide betrachteter Punkt bei dieser Drehung still zu stehn scheinen, bilden sie hingegen einen Winkel mit einander, so wird er bei der Drehung einen Kreis zu beschreiben scheinen. Vermittelst eines solchen nicht centrirten Reversionsprismas können nun leicht die beiden stereoskopischen Zeichnungen zum Decken gebracht werden, wenn die eine mit blofsem Auge, die andre durch das Reversionsprisma betrachtet wird. Dies gilt auch für nicht symmetrische Projectionen, die aufserdem in einer Ebene jede beliebige Lage gegen einander haben können, welche durch die Stellung der Prismen in eine gleichartige verwandelt wird.

## 10. Reversionsfernrohr.

Schraubt man das genau centrirte Reversionsprisma vor das Ocular eines astronomischen Fernrohrs, so erhält man das Reversionsfernrohr, welches die Eigenthümlichkeit besitzt, dafs man einen Gegenstand in jeder beliebigen Neigung gegen den

Horizont betrachten kann, und dafs dennoch der Gegenstand stehen bleibt, wenn man das Fernrohr um seine Achse dreht. Die Prismen sind in eine cylindrische Hülse gefafst, das zweite gegen das erste drehbar. Der Umfang des drehbaren Stückes ist wie der Kopf einer Mikrometerschraube in Grade getheilt, und auf der cylindrischen Hülse des festen durch zwei gegenüberstehende Striche angegeben, wo die Brechungsebene des festen Prismas liegt. Der Nullpunkt der drehbaren Theilung entspricht der Brechungsebene des beweglichen Prismas. Machen die Brechungsebenen den Winkel 0°, so ist das Fernrohr ein astronomisches, hingegen ein terrestrisches, wenn die Brechungsebenen auf einander lothrecht. Bilden sie hingegen einen spitzen Winkel, so erscheint der Gegenstand um den doppelten Winkel geneigt.

Bei der Kürze des Prismenoculars ist ein so construirtes terrestrisches Fernrohr viel kürzer als ein gewöhnliches, also als Marine- oder Militärfernrohr zu empfehlen. Es ist wie ein Blendglas vor jedes astronomische Ocular aufzuschrauben; ich habe dasselbe von Herrn Oertling ausgeführte Prismenocular bei einem kleinen Theodolitfernrohr und bei einem Dollond von 4″ Oeffnung angewendet. Soll es nur als terrestrisches Ocular dienen, so ist es zweckmäfsig, die Prismen so zu befestigen, dafs ihre Brechungsebenen ein für allemal einen rechten Winkel mit einander machen. Das Fadenkreuz befindet sich im Brennpunkt des astronomischen Oculars. Bei Aufnahmen, bei welchen Nummerpfähle abgelesen werden, hat es das Angenehme, die Zahlen nicht umzukehren.

Um die Neigung einer im Gesichtsfeld des Fernrohrs gesehene Linie, also z. B. einen Böschungswinkel zu messen, verfährt man auf folgende Art: man stellt im Fernrohr die Prismen auf 90° ein, d. h. so, dafs der Gegenstand in seiner natürlichen Lage erscheint und dreht das Fernrohr um seine Achse, bis der feste lothrechte Faden des Fadenkreuzes die Linie deckt, deren Neigung man messen will. Man dreht nun das vordere Prisma bis der Faden und der dadurch verdeckte Gegenstand der Richtung eines vor dem Fernrohr frei aufgehängten Lothes entsprechen. Der Drehungswinkel ist die halbe Ergänzung des gesuchten Neigungswinkels.

Man kann das Reversionsprisma auch im Fernrohr oder vor dem Objectiv desselben anbringen und seine Gröfse so wählen, dafs man durch die nicht bedeckten Theile des Objectivs die Linie in unveränderter oder umgekehrter Lage sieht, wenn das Fernrohr ein astronomisches ist, durch das gedrehte Prisma hingegen in willkürlich geneigter Lage. Man bringt die beiden Linien, deren Neigung man messen will, zur Coincidenz, nämlich die eine durch den nicht verdeckten Theil des Objectivs gesehene mit der andern durch das Reversionsprisma gesehenen. Ist das Reversionsprisma im Innern des Fernrohrs, so hat das terrestrische Fernrohr die Länge des astronomischen. Man verkürzt das gewöhnliche terrestrische also um die ganze Länge des terrestrischen Ocularansatzes. Soll es dann drehbar sein, so besteht die Röhre des Fernrohrs aus zwei auf einander geschraubten Theilen, in deren einem das veränderliche Prisma, im andern das bewegliche ist. In einem Frauenhofer von 3″ Oeffnung erhielt ich ein sehr schönes Bild.

Da bei allen gleichschenkligen Dreiecken die Bedingung einer totalen Reflexion für nahe an der Grundlinie parallel derselben auffallende Strahlen erfüllt wird, so gilt das bisher für ein rechtwinkliges gleichschenkliches Dreieck Gesagte für alle gleichschenkligen. Aber natürlich nimmt die Anzahl der nach einmaliger Brechung noch die Grundfläche treffenden Strahlen immer mehr ab, je spitzer der Winkel an der Spitze des Dreiecks ist. Durch eine Zuschärfung des rechten Winkels nimmt die Länge des Oculars ab und die Lichtstärke des reflectirten Strahles zu. Der Lichtverlust selbst ist nicht erheblich, da hier vier Brechungsebenen wie bei dem gewöhnlichen Ocular sind.

Die Anwendung des Reversionsprisma zur elliptischen Polarisation folgt weiter unten.

# III. Polarisation des Lichtes.

## 1. Apparat für geradlinige, elliptische und circulare Polarisation des Lichtes.

Die Anforderungen, welche man an einen zweckmäfsig construirten Polarisationsapparat machen kann, sind folgende:

1. Dafs das Licht wirklich vollständig, nicht theilweise polarisirt sei. Dies erhält man dadurch, dafs man das Licht weder durch Spiegelung, noch durch einfache Brechung polarisirt, sondern durch Doppelbrechung.

2. Dafs der Apparat bei Tageslicht eben so bequem anwendbar sei, als bei Lampenlicht, und dafs er Lichtstärke genug besitze, um bei einer monochromatischen Beleuchtung seine Zwecke zu erfüllen.

3. Dafs man ihn an jeder Stelle eines Zimmers gleich gut gebrauchen könne, welches dadurch erhalten wird, dafs man, um die Erscheinungen wahrzunehmen, indem man in das Instrument hineinblickt, zugleich nach der Lichtquelle sieht.

4. Dafs man die analysirende sowohl als die polarisirende Vorrichtung mit beliebiger Geschwindigkeit um die Achse des Instruments drehen kann, ebenso die in dem Apparat betrachteten Scheiben.

5. Dafs man gekühlte und gepreſste Gläser und parallel der Achse geschnittene Krystallscheiben, sowie circularpolarisirende Flüssigkeiten eben so gut untersuchen kann, als auf die Achse senkrecht geschnittene Krystallscheiben, welche dicht an der analysirenden Vorrichtung sich befinden.

6. Dafs die Polarisationsfarben vollkommen rein sind, d. h. nicht durch dichroitische Absorption in einem nicht farblosen Körper erhalten.

7. Dafs man die Ringsysteme stark und schwach doppelbrechender Krystalle gleich gut darin beobachten kann.

8. Dafs man das linear polarisirte Licht sogleich in circulares oder elliptisches verwandeln kann.

9. Dafs man mit dem Apparat Messungen ausführen kann.

10. Dafs man in dem Apparat befindliche Gegenstände während des Hineinblickens erwärmen, pressen, in tönende Vibrationen versetzen oder von einem electrischen Strome umfliefsen lassen kann.

11. Dafs man die durch Doppelbrechung erhaltene Polarisation und Analyse bequem durch eine vermittelst einfacher Brechung oder Spiegelung erhaltene ersetzen kann.

Diesen Anforderungen habe ich auf folgende Weise zu entsprechen gesucht [1]).

Auf einem gewöhnlichen dreibeinigen messingnen Fernrohrstativ mit horizontaler und verticaler Bewegung, dessen Höhe, da es eine Auszugsröhre enthält, vermittelst der Klemmschraube $a$ (Fig. 8) von 16 bis 25 Zoll vergröfsert werden kann, ist in einer Hülse $h$ ein dreiseitiges, zwei Fufs langes, in Pariser Zoll und Linien getheiltes messingnes Prisma $bc$ verschieblich. Dieses Prisma trägt 6 Schieber, $s_1$, $s_2$, $s_3$, $s_4$, $s_5$, $s_6$, welche sich vermittelst Klemmschrauben an jeder beliebigen Stelle der Scale fixiren lassen, und an welchen sich oben in Ringe endende Ständer befinden. Die Mittelpunkte sämmtlicher Ringe liegen in einer dem dreiseitigen Prisma parallelen Geraden, welche die optische Achse des Instruments ist. Von diesen 6 Schiebern trägt $s_6$ die Collectivlinse $p$ von 12 Zoll Brennweite und 3 Zoll Oeffnung, $s_2$ die polarisirende Vorrichtung $e$, $s_5$ die analysirende $d$ aus einem Nicol'schen Prisma bestehende Vorrichtung.

Fällt paralleles Licht auf die Collectivlinse, so wird das polarisirende Prisma im Brennpunkt desselben sich befinden müssen, um alles auffallende Licht zu polarisiren; benutzt man hingegen das Licht einer Lampe, so mufs es sich in der Vereinigungsweite der Strahlen befinden, welche divergirend auf die Collectivlinse auffallen. Bei dem Einstellen verschiebt man natürlich nicht das Nicol'sche Prisma, sondern die Collectivlinse, bis das concentrirte Licht der Lampe grade in die Oeffnung des Prismas fällt.

Um die Polarisationsebenen der beiden Prismen willkürlich zu verändern, sind an den Ringen der Ständer $s_2$ und $s_5$ ein-

[1]) Poggend. Ann. 35, p. 596. und Scientific Memoirs 1 p. 86.

getheilte Messingscheiben angebracht, auf welchen sich ein an den Prismen angebrachter Zeiger bewegt, der, wenn er rückwärts über den Befestigungspunkt verlängert gedacht wird, mit der kürzern Diagonale der rhombischen Grundfläche des Nicol-schen Prismas zusammenfällt. Die Eintheilung des Kreises ist so aufgetragen, dafs bei verticaler Stellung des Ständers die durch die Punkte 0° und 180° gehende Gerade horizontal liegt. Fig. 9 zeigt in halber Gröfse die Ansicht dieser Scheibe für das polarisirende Prisma des Ständers $s_3$. Die Theilung ist dem bei $d$ befindlichen Auge zugekehrt, die Scheibe selbst dient zugleich, um fremdes Licht abzublenden, ihr Durchmesser beträgt daher $2^3/_4$ Zoll. Die Kreistheilung des polarisirenden Prismas befindet sich auf einem ringförmigen, durch zwei feste Durchmesser in vier Quadranten getheilten Kreise (Fig. 10). Das Nicol'sche Prisma $a$ dreht sich auf einem Durchmesser $bc$, der an seinen Enden Nonien trägt; vermittelst derselben wird der direct in halbe Grade getheilte, $2^1/_2$ Zoll im Durchmesser haltende Kreis in Minuten getheilt. In der Zeichnung des ganzen Instruments (Fig. 8) ist diese Theilung weggelassen, da für viele Beobachtungen eine getheilte Scheibe ausreicht.

Die die Nicol'schen Prismen tragenden Ständer lassen sich vermittelst eines Anschlags $r$ (Fig. 9) horizontal und vertical stellen, dasselbe gilt von dem Ständer $s_3$. Bei heiterm Wetter, wo das von dem Himmelsgewölbe reflectirte Licht bereits mehr oder weniger stark polarisirt ist, richtet man das Instrument wo möglich nach einer von der Sonne beleuchteten weifsen Mauer. Will man aber das von dem Himmelsgewölbe reflectirte Licht direct benutzen, und zwar in gröfstmöglichster Intensität, so geschieht dies am einfachsten auf folgende Art: man dreht, nachdem man das polarisirende Prisma mit seiner Scheibe horizontal gelegt hat, das analysirende so lange, bis man in einer im Ringe $b$ des Ständers $s_4$ befindlichen, senkrecht auf die Achse geschnittenen Kalkspathplatte das Ringsystem mit dem schwarzen Kreuz erhält, stellt dann das polarisirende Prisma $e$ wieder vertical und dreht dasselbe so lange, bis man dieselbe Erscheinung im Kalkspath wahrnimmt. Der Zeiger des polarisirenden Prismas $e$ giebt dann die Richtung der Polarisationsebene

des einfallenden Lichtes und die Ringe erscheinen dann in gröfster Klarheit.

Stellt man den Ständer des Instruments parallel der Weltachse, so weist der Zeiger des nach dem vorigen Verfahren orientirten Prismas *e* nach der Sonne, die Theilung desselben dient dann als Sonnenuhr, welche ihre Dienste auch noch in der Dämmerung verrichtet.

Das von dem polarisirenden Prisma divergirend ausgehende Licht wird zuerst von einer unter *v* angedeuteten Convexlinse von $1\frac{1}{2}$ Zoll Brennweite, deren Entfernung von der Oeffnung *e* 3 Zoll beträgt, und welche unmittelbar auf der Mitte der getheilten Kreisscheibe befestigt ist, aufgefangen und fällt dann auf die 3 Zoll entfernte Linie *k* von $1\frac{1}{2}$ oder kürzerer Brennweite des Ständers $s_3$. Von hier aus geht es durch den im Ring *l* befindlichen, im polarisirten Lichte zu untersuchenden Krystall des Ständers $s_4$ und nun in das analysirende Prisma *d*, in dessen unterm Ende eine unter *u* angedeutete Hohllinse von 4 bis 5 Zoll Brennweite eingeschraubt ist. Diese Linse kann für weitsichtige weggelassen werden. Dem Ring *l* kann vermittelst einer Kugelbewegung, welche in Fig. 8 dargestellt ist, jede beliebige Neigung gegen die Achse des Instruments gegeben werden. Noch bequemer ist der Fig. 11 vorgestellte, in dem Ständer $s_4$ befestigte Krystallhalter *lop*. Er ist in der Zeichnung nicht eingestellt. Dies geschieht vermittelst des Stiftes *mn* in horizontaler, vermittelst des Stiftes *op* in lothrechter Richtung. Da *mn* in der Hülse drehbar ist, so giebt man dem Krystall die erforderliche Neigung gegen die optische Achse des Instruments, ehe man ihn durch die Schraube *o* befestigt. Soll der scheinbare Achsenwinkel bestimmt werden, so wird der Krystall in dem Ständer Fig. 12 befestigt, der seitlich eine lothrechte Kreistheilung *ab* trägt. Der hohle Ring *cd* steht lothrecht, wenn der bei *e* auf dem heraufgebogenen Theile des Messingstreifen *ef* gezogene Strich dem Nullpunkt der Theilung entspricht. Will man aber zur Darstellung der isochromatischen Curven zwei der Achse parallel geschnittene Krystallplatten oder zwei gleich dicke Glimmerblätter combiniren, so geschieht dies dadurch, dafs man dem Ring *l* (Fig. 8) zwei Schraubengewinde

giebt, so dafs die eine Platte auf der *k* zugewendeten Seite eingeschraubt wird, die andre auf der *f* zugewendeten Seite.

Der Ring *m* (Fig. 8), nahe in der Brennweite von *k*, ist zur Aufnahme gekühlter Gläser, Gypsblättchen und Amethyste bestimmt. Diese gekühlten Gläser müssen, wenn sie ganz übersehen werden sollen, nicht grofs sein, etwa bis zu einem halben Zoll Durchmesser. Grofse gekühlte Gläser, z. B. Glaskreuze bis $2\frac{1}{2}$ Zoll Durchmesser, werden am besten in Licht betrachtet, welches durch Spiegelung oder einfache Brechung polarisirt ist. Sie werden in den Ring des Ständers $s_6$ eingesetzt und durch das analysirende Prisma betrachtet, nachdem das polarisirende Prisma *v* und die Linse *k* zur Seite gebogen sind, und die Ringe *m* und *n* aus ihren Ständern $s_3$ und $s_4$ herausgenommen worden. Um einen horizontalen Polarisationsspiegel zu benutzen, ist über die drei Stücke des Charniers 9 auf der linken Seite der Fig. 8 ein Strich gezogen. Bilden die Theile dieses Striches eine gerade Linie, so ist die Stange *bc* unter dem Polarisationswinkel gegen einen horizontalen Spiegel geneigt. Bequemer ist es aber, ein für allemal einen schwarzen Spiegel unter der entsprechenden Neigung auf einen Ring zu befestigen, der auf der Collectivlinse *p* nach *c* hin sich aufschrauben läfst. Soll das Licht durch einfache Brechung polarisirt werden, so befestigt man vor der Objectivlinse nach *c* hin auf einem besondern Schieber einen Satz dünner Glasscheiben, der in einem drehbaren Ringe, durch zwei Stifte befestigt, jede beliebige Neigung annehmen kann. Soll das Licht durch Spiegelung analysirt werden, so dient dazu die Vorrichtung Fig. 13, wo *u* die Hohllinse trägt wie in Fig 8. Für die Analyse durch einfache Brechung ist es passend, einen kleinen Glassatz in eine cylindrische Fassung, wie ein Nicol'sches Prisma, zu fassen. Man erhält auf diese Weise alle möglichen Combinationen, nämlich:

1. zwei Nicol'sche Prismen,
2. ein Nicol'sches Prisma und einen ebenen Spiegel,
3. ein Nicol'sches Prisma und einen Glassatz,
4. zwei ebene Spiegel,
5. einen ebenen Spiegel und einen Glassatz,
6. zwei Glassätze.

Es kommt nun darauf an, die lineare Polarisation und Analyse auf eine bequeme Art in circulare und elliptische zu verwandeln. Dies geschieht auf folgende Art: die um die Zapfen *n* und *o* drehbaren Arme *f* und *g* (Fig. 8) enthalten Blättchen von zweiachsigem Glimmer, von der Dicke, dafs sie, wenn sie aus der Lage, in welcher sie das lineare Licht unverändert lassen, um 45° links oder rechts von der Ebene der primitiven Polarisation gedreht sind, zwischen den beiden durch Doppelbrechung in diesen Blättchen entstehenden Strahlen gerade einen Gangunterschied von ¼ Undulation hervorbringen.

Liegen beide Blättchen zur Seite, so wird das geradlinig polarisirte Licht geradlinig analysirt. Um geradlinig polarisirtes Licht circular zu analysiren, wird *f* vorgelegt. Soll circular polarisirtes Licht linear analysirt werden, so wird *f* zur Seite gebogen und *g* vorgelegt. Beide Blättchen müssen wie in Fig. 8 vorliegen, wenn circular polarisirtes Licht circular analysirt werden soll. Der Hauptschnitt des Glimmerblättchens ist auf der Fassung desselben angegeben. Läfst man ihn, statt den Punkten 45° und 135° zu entsprechen, durch andere Theilungspunkte gehen, so erhält man die Erscheinungen der elliptischen Polarisation, und zwar alle Uebergänge des rechts circularen durch rechts elliptisches, lineares, links elliptisches in links circulares, wenn das Blättchen in seiner Ebene von *ff* nach *gg* gedreht wird. Um die Stellung des Glimmerblättchens in den verschiedenen Azimuthen der Drehung zu finden, projicirt man einen in der Verlängerung von *gg* am Ring befindlichen Stift auf die Kreistheilung des polarisirenden Prismas.

Um gröfsere gekühlte Gläser im circular polarisirten oder elliptischen Lichte zu untersuchen, spaltet man sich ein, einen Gangunterschied von ¼ Welle gebendes Glimmerblatt von der Gröfse der Oeffnung der Beleuchtungslinse und befestigt dasselbe in einem auf dem Ständer $s_6$ drehbaren Ringe. Dieser Schieber trägt daher zwei Ständer, *q* und *r*, den einen (*q*) zur Aufnahme der gekühlten Gläser, den andern (*r*) zur Aufnahme des circular polarisirenden Glimmerblatts unmittelbar hinter denselben.

Soll statt weifsen Lichtes einfarbiges oder dichromatisches einfallen, so werden kleine Holzringe von 1 Zoll Durchmesser

mit farbigen Gläsern vor die Oeffnung des polarisirenden oder analysirenden Prismas befestigt oder das Licht einer monochromatischen Lampe durch die Beleuchtungslinse auf der Oeffnung des polarisirenden Prismas concentrirt. Bei Sonnenschein nimmt man die Beleuchtungslinse herunter und wirft die Farben des Spectrums nach einander durch Drehung eines guten Flintglasprismas direct auf die Oeffnung des polarisirenden Nicols. Wendet man einen Spiegel an, so richtet man das Instrument, ehe er auf die Beleuchtungslinse aufgeschraubt ist, nach der Lampe, schraubt den Spiegel dann so auf dasselbe, dafs die Reflexionsebene horizontal liegt und dreht das Instrument um 90° um das dreibeinige Stativ [1]).

Für Krystalle von schwacher doppelbrechender Kraft, wie Beryl, Turmalin, Bergkrystall u. s. w., wird die analysirende

[1]) Die schönste Erscheinung zeigt eine mit Kochsalz oder salpetersaurem Natron gelb gefärbte Weingeistflamme. Die Verbindungscurven zwischen den Ringsystemen des Arragonit erhält man am schärfsten, wenn man linear einfallendes Licht elliptisch analysirt, also das Blättchen *f* etwas in seiner Fassung dreht. Bei linearer Polarisation und circularer Analyse setzen im Kalkspath die Quadranten der dunkeln Curven plötzlich in die der hellen ab. Die schönste Farbenerscheinung erhält man aber bei Anwendung eines etwa zwei Linien dicken, durch Kobalt gefärbten Glases, welches die Enden des Spectrums durchläfst, aber seine Mitte verlöscht. Im Arragonit und Salpeter sieht man deutlich, dafs die rothen Achsenpaare mit den blauen in einer Geraden liegen, der Winkel der erstern aber kleiner als der der letztern ist. Bei circularer Polarisation und circularer Analyse, wo die Lemniscaten ohne schwarze Büschel erscheinen, ebenfalls sehr bestimmt. Bei Baryt und kohlensaurem Blei scheiden sich die verschiedenfarbigen Ringsysteme deutlich. Beim Kalkspath tritt durch das Coincidiren und Nebeneinanderlegen der für die verschiedenen Farben concentrischen Kreise eine merkwürdige Abwechselung von Farben ein; die beiden innern Ringe sind intensiv roth, getrennt durch einen tief blauen Ring. Weiter folgt ein schwarzer und jenseits des dritten rothen Ringes ein in das weifse ziehender hellblauer, dem dann mit rothen abwechselnd violette folgen. Bei diesem Versuch mufs das Licht einer hellen weifsen Flamme auf der Oeffnung des polarisirenden Nicol durch die Beleuchtungslinse concentrirt sein. Combinirt man das violette Glas mit einem Rubinglase und dann mit einem schwachgrünen, so erhält man homogene rothe und blaue Beleuchtungen, und sieht in der zweiten die Ringsysteme viel enger als in der ersten.

Vorrichtung durch ein polarisirendes Mikroskop ersetzt, und zwar auf folgende Weise. Statt der Linse *k* wird in den Ständer $s_3$ eine stärker brechende Doppellinse eingeschraubt, die man dadurch erhält, dafs man der umgekehrt eingesetzten Linse *k* auf der dem Auge zugekehrten Seite eine planconvexe hinzufügt, deren hinterer Krümmungshalbmesser 3‴4 beträgt. Statt des Nicol'schen Prismas in *u* wird eins angewendet zwischen einer dem Auge zugewendeten Planconvexlinse von 3‴5 Krümmungshalbmesser und einer Doppellinse, aus zwei planconvexen, 2‴ von einander entfernten, bestehend, die in einer gemeinsamen Fassung befestigt sind und ihre convexen Seiten einander zukehren. Der Krümmungsradius der dem Nicol nächsten Linse ist 2‴7, der der entfernteren 3‴5.

Wesentliche Bedingungen für die gehörige Gröfse des Gesichtsfeldes ohne Anwendung des polarisirenden Mikroskops sind, dafs die Fassungen der Nicol'schen Prismen nicht länger als 6 Linien sind, und das Glimmerblättchen der analysirenden Vorrichtung dicht vor dem Nicol sich vorbei bewegt. In der Zeichnung ist der deutlichern Ansicht wegen das Glimmerblättchen zu weit vom Nicol entfernt. Wählt man statt der Nicol'schen Prismen Turmalinplatten, so erhält man eine Vergröfserung des Gesichtsfeldes auf Kosten der Reinheit der Farben. An die Stelle der Prismen werden für bestimmte Versuche doppelbrechende achromatisirte Prismen eingeschraubt.

Für circular polarisirende Flüssigkeiten werden alle Ständer aufser $s_2$ und $s_5$ entfernt, und diese so weit auseinander gestellt, dafs eine Röhre von hinlänglicher Länge zwischen ihnen eingeschaltet werden kann.

Will man Gläser oder Krystalle erwärmen, so wird die Stange *bc* um 120° gedreht und in die Fassung *h* eingesteckt. Die optische Achse des Instruments liegt dann nicht über der Stange, sondern neben derselben, so dafs die zu betrachtenden Substanzen, auf einer Metallplatte stehend, durch eine darunter befindliche Lampe erwärmt werden können.

Um die Ablenkung der Polarisationsebene durch einfache Brechung zu erhalten, werden die refrangirenden Körper in den Ständer $s_3$ gebracht. Die Ablenkung durch Reflexion kann,

wenn man die optische Achse des Instruments parallel erhalten will, durch eine Anzahl grader vielfacher Reflexionen erhalten werden. Es ist dann am bequemsten, den Ständer $s_1$ der Beleuchtungslinse und des polarisirenden Prismas $s_2$ so zu construiren, dafs er sich erhöhen läfst, so dafs, wenn man die Beleuchtungslinse und das polarisirende Prisma um gleich viel erhöht, die Achse des aus der Beleuchtungslinse austretenden und auf die Oeffnung des polarisirenden Nicols fallenden Lichtkegels parallel mit sich in einer Ebene verschoben wird. Das aus diesem Nicol austretende polarisirte Licht fällt dann auf ein System zweier paralleler Metallspiegel, $ab$ und $a_1 b_1$, die ihre spiegelnden Seiten einander zukehren (Fig. 14) und durch Annäherung an einander die doppelte Reflexion in eine vierfache, sechsfache u. s. w. verwandeln. Diese beiden Spiegel sind um eine horizontale Achse drehbar, wodurch es möglich wird, den Einfallswinkel des Lichtes auf dieselben beliebig zu verändern. Bei dieser Drehung bleibt die zusammenfallende Reflexionsebene beider Spiegel immer lothrecht, während die Drehung des polarisirenden Nicols das Azimuth des einfallenden Lichtes verändert, dessen durch die Reflexion eingetretene Veränderung dann vermittelst des analysirenden Nicols an der Kreistheilung desselben gemessen oder ans den Farbenerscheinungen der in $l$ befindlichen Krystalle geschlossen wird.

Für eine ungrade Anzahl von Reflexionen müfste die Achse an einer bestimmten Stelle eingebogen werden. Dies schien mir nicht zweckmäfsig, da man die hierher gehörigen Erscheinungen am einfachsten durch zwei Nicol'sche Prismen erhält, die sich in einer lothrechten Ebene beliebig neigen lassen, also an einem lothrechten Kreise verstellbar sind.

Um die einfachen Intensitätsversuche anzustellen, ist es vortheilhaft, das Gesichtsfeld abzublenden. Dies geschieht durch einen hohlen Cylinder von 1 Zoll Höhe, welcher auf das etwas hervorstehende Ende der Fassung der Linse $k$ nach $m$ hin aufgeschraubt wird. Die Oeffnung der Blendung im Boden dieses Cylinders ist $1\frac{1}{2}$ Linie. Dieser scharf begrenzte helle Kreis giebt für diese Versuche ein sehr gutes Object ab. Dreht man das analysirende Prisma in seiner Fassung, so erhält man die

Abnahme der Intensität nach dem Gesetz von Malus; legt man eins der Glimmerblättchen vor, so bleibt bei der Drehung die Intensität des Lichtes unverändert. Schraubt man statt des analysirenden Nicol'schen Prismas ein achromatisches, in gleicher Fassung befindliches doppelbrechendes Prisma ein, so erhält man die analogen Erscheinungen für beide Bilder. Dieselben Erscheinungen erhält man für das durch Reflexion polarisirte Licht, wenn man die Linse *k* und das polarisirende Prisma *l* zur Seite legt. Die Einfassung der Beleuchtungslinse dient dann als das zu betrachtende Object. Will man das Gesichtsfeld verkleinern, so setzt man in den Ständer $s_6$ eine Scheibe ein mit centraler kreisförmiger Oeffnung. Durch Verschieben derselben an der Scale *ac* gehen die Bilder dann vom Uebergreifen bis zur vollständigen Trennung auseinander. Die Bilder erscheinen prachtvoll complementar gefärbt, und wo sie über einander greifen, weifs, wenn man an der Stelle des Glimmerblättchens *f* eine sehr dünne, parallel der Achse geschliffene Bergkrystallplatte einschaltet.

Ein in den Ring *l* eingeschraubtes doppelbrechendes Prisma giebt, wenn das polarisirende Prisma *e* zur Seite gebogen, aber *k* aufrecht und der Polarisationsspiegel nicht aufgesetzt ist, zwei auf einander senkrecht polarisirte Bilder der auf der Linse *k* aufgeschraubten Blendung, deren Intensitätsänderungen durch Drehung des analysirenden Prismas *u* erhalten werden. Legt man das Glimmerblättchen *f* vor, so werden die Bilder, wenn der Hauptschnitt des doppelbrechenden Prismas lothrecht oder horizontal liegt, rechts und links circular, und man erhält eine Vorrichtung, welche in ihren Wirkungen übereinstimmt mit dem von Fresnel angegebenen Apparate, welcher aus drei Bergkrystallprismen, von welchen zwei einem rechts gewundenen und das eine einem links gewundenen Krystall angehören, besteht. Bei Drehung des analysirenden Prismas behalten die Bilder ihre Intensität unverändert. Ist das analysirende Prisma ebenfalls ein doppelbrechendes, so bewegen sich bei der Drehung desselben, wenn das Glimmerblatt zwischen liegt, zwei Bilder gleichbleibender Intensität um zwei feststehende mit derselben Eigenschaft.

Schraubt man auf die durchgehende Fassung des analysirenden Prismas eine senkrecht auf die Achse geschnittene Kalkspathplatte, so erhält man, wenn in $l$ das doppelbrechende Prisma befindlich ist, in den getrennten circular polarisirten Räumen die entsprechenden Modificationen des Ringsystems; befindet sich hingegen im Ring $l$ eine zweite ebenfalls auf die Achse senkrecht geschnittene Platte von Kalkspath, so ist es leicht durch Drehung dieses Ringes, diese genau mit der ersten zu centriren. Auf diese Weise kann man, wenn in $f$ ein Glimmerblatt von bestimmter Dicke eingeschaltet wird, die Erscheinungen eines Kalkspathzwillings nachbilden. Liegt $f$ zur Seite, so erhält man bei Drehung des Ringes $l$ die aus der Combination zweier nicht centrirter Platten entstehenden isochromatischen Curven. Auf ähnliche Weise kann man die Veränderung des Durchmessers der Ringe erhalten, welche centrirte Platten geben, wenn sie beide positiv und beide negativ, oder eine positiv und die andre negativ ist.

Dem hier beschriebenen Polarisationsapparat können drei Convexlinsen, eine Hohllinse und ein mikroskopisches Objectiv beigegeben werden. Der Apparat dient dann als offnes Fernrohr und offnes Mikroskop. Im ersten Falle ist die Beleuchtungslinse das Objectiv, die Ständer $s_2$, $s_3$, $s_5$ tragen die drei Convexlinsen. Man schlägt, nachdem $s_2$ von $s_1$ um die Summe ihrer Brennweiten entfernt, $s_3$ und $s_5$ um und erhält das astronomische Fernrohr, welches bei dem Aufrichten von $k$ und $u$ sich in ein terrestrisches verwandelt. In den Ring $l$ setzt man ein Fadenkreuz ein. Trägt $s_2$ eine Hohllinse, so bildet es mit $s_1$ ein galiläisches Fernrohr. Der Ständer $s_6$ trägt das mikroskopische Object, wenn $s_1$ entfernt und $s_2$ die mikroskopische Linse enthält. Das dann einfache Mikroskop verwandelt sich durch Hinzufügung einer Convexlinse als Collectiv in $k$ und einer als Ocular in $u$ in ein zusammengesetztes.

Die Abänderung des Apparates, um ihn in Rotation um seine Achse zu versetzen, ist aus Fig. 11 unmittelbar ersichtlich. Statt der Ständer $s_2$ und $s_5$ werden zwei gleich hohe aufgesetzt, in deren feststehenden Ringen hohle Rollen vermittelst des Schnurlaufes eines Schwungrades mit zwei Rinnen in eine

schnelle Drehung versetzt werden können. Beide Rollen können sich in gleichem Sinne drehen, aber auch durch Kreuzung der einen Schnur in entgegengesetztem. In die hohlen Rollen können auf beiden Seiten derselben Nicol'sche Prismen oder Turmaline, circular polarisirende Glimmerblättchen oder geschliffene Bergkrystallplatten eingeschraubt werden. Das dreibeinige Stativ des Apparates steht fest in drei Vertiefungen eines horizontalen Brettes, auf welchem senkrecht das Schwungrad sich unmittelbar unter dem verschiebbaren Prisma *bc* befindet, so dafs der Beobachter es bei dem Durchsehen durch die analysirende Vorrichtung bequem selbst drehen kann.

## 2. Erscheinungen im rotirenden Polarisations-Apparate. (Pogg. Ann. 71, p. 97).

1. Das bei dem Stillstehen des polarisirenden Nicols vollständig geradlinig polarisirte Licht verhält sich, so wie derselbe in schnelle Drehung versetzt wird, ganz wie natürliches. Durch ein doppelbrechendes Prisma untersucht, giebt es bei langsamer Drehung desselben stets Bilder von gleicher Helligkeit. Die intensive complementare Färbung der übergreifenden Ränder dieser beiden Bilder bei Einschaltung eines Gypsblättchens, eines Glimmers oder einer dünnen Scheibe eines Bergkrystalls verschwindet vollständig. Die bei langsamer Drehung der polarisirenden Vorrichtung die Farben des Spectrums durchlaufende Mitte des Ringsystems des Bergkrystalls erscheint bei schneller Drehung vollkommen farblos, wobei es gleichgültig ist, ob der Krystall ein rechts oder links gewundener ist, und in welchem Sinne die Drehung geschieht.

2. Die complementaren Ringsysteme um die Achse sowohl positiver als negativer einachsiger Krystalle neutralisiren sich vollständig zu Weifs. Dies gilt in gleicher Weise von dem von der Farbenfolge der Newton'schen Ringe so abweichenden Ringsystem des Apophyllit. Die prachtvollen isochromatischen Curven eines auf die Halbirungslinie der optischen Achsen senkrecht geschliffenen Salpeters, Arragonits, Topases verschwinden eben so vollständig, als die complicirten Systeme der Krystalle,

wo die für die verschiedenen Farben verschiedenen Achsenpaare sehr ungleiche Neigung gegen dieselbe Halbirungslinie haben (Seignettensalz), oder in derselben Ebene um verschiedene Halbirungslinien liegen (Gyps), oder endlich in verschiedenen Ebenen um dieselbe Halbirungslinie (Borax). Dasselbe gilt, wenn, wie bei dem Zucker, die Platte senkrecht auf eine optische Achse geschliffen ist. Eben so verschwinden die durch ein liegendes Kreuz durchschnittenen Farbencurven um die gemeinsame Halbirungslinie der Achsen gleich dicker combinirter Platten von Glimmer oder Arragonit, die geradlinigen Interferenzlinien combinirter Compensationsplatten von Bergkrystall, endlich sämmtliche Farbenerscheinungen gekühlter und gepreſster Gläser.

3. Von dem wirklichen Vorhandensein des Zustandes der Polarisation einerseits und der Farbencurven andererseits kann man sich, wie schnell auch die Drehung sein mag, leicht überzeugen. Man braucht nur an die Stelle der Lampe eine sich selbst entladende Kleist'sche Flasche zu setzen, um den im Dunkel rotirenden Nicol für einen Augenblick zu beleuchten und die Rotation in scheinbare Ruhe zu verwandeln.

4. Bei monochromatischer Beleuchtung verschwinden die dunkeln Interferenzlinien in einer gleichförmigen Färbung. Sondert man bei einem zweiachsigen Krystall vermittelst eines durch Kobalt gefärbten Glases das rothe Ringsystem von dem violetten, so verschwinden beide während der Drehung in einer ungesonderten Mischungsfarbe, wobei es gleichgültig ist, ob, wie bei dem Salpeter, die rothen Achsen den kleineren Winkel bilden, oder wie bei dem kohlensauren Blei die violetten.

5. Alle Erscheinungen bleiben dieselben, wenn das aus der rotirenden linear polarisirenden Vorrichtung austretende Licht circular oder elliptisch analysirt wird.

6. Dasselbe gilt, wenn vor dem polarisirenden rotirenden Nicol ein im Azimuth 45° circular polarisirendes Glimmerblättchen fest aufgestellt ist.

7. Läfst man das aus dem rotirenden Nicol austretende Licht auf einen Metallspiegel fallen, so verhält es sich nach der Reflexion von demselben wie natürliches. Die in einer Kalkspathplatte bei langsamer Drehung des Nicols sichtbaren Ring-

systeme neutralisiren sich also bei schneller Drehung ebenfalls zu Weifs.

8. Die Zwillingsverwachsungen der Krystalle geben zu sehr verwickelten Farbenphänomenen Veranlassung. Besonders schön sieht man dies an Kalkspathplatten, welche senkrecht geschliffen sind auf die Achse des einschliefsenden Individuums. Ich habe einige derselben früher künstlich nachgebildet, indem ich zwischen zwei genau centrirte einfache Kalkspathplatten ein Glimmerblättchen von bestimmter Dicke einschaltete (siehe Abschnitt IV. 6). Da nun die natürlichen Zwillingsplatten bei langsamer Drehung ihre Farbenerscheinungen ununterbrochen in jedem Quadranten ändern, so fragte es sich, ob auch diese verwickelten Farbenfiguren sich bei schneller Drehung zu Weifs neutralisiren. Dies gelang bei einem natürlichen Zwilling, obgleich es äufserst schwierig ist, die Platte für diesen Zweck vollständig zu centriren. Eine einfache Platte behält, wenn sie auch noch so schnell zwischen den stehendbleibenden Nicol gedreht wird, hingegen ihr Ringsystem unverändert.

Das Centriren mufs für die Nicol'schen Prismen ebenfalls wenigstens in der Weise erfüllt sein, dafs man nicht über die Grenzlinie des hellen und dunklen Raums abwechselnd hinwegsieht. Bei Turmalinen ist ein solches genaues Centriren viel weniger nöthig.

9. Wenn die Drehungsgeschwindigkeit innerhalb jedes ganzen Umlaufs stetig zu- oder abnimmt, so treten die Phänomene ein, welche theilweise polarisirtes Licht zeigt. Die Polarisationsebene desselben liegt in der Richtung des Minimums der Geschwindigkeit.

10. Polarisirt man das auf den rotirenden Nicol einfallende Licht durch Reflexion vollständig linear, so erscheint das aus dem Nicol austretende Licht theilweise in der ursprünglichen Ebene polarisirt. Der Grund ist leicht einzusehen. Stellt man den analysirenden Nicol so, dafs man die reflectirten Newton'schen Ringe von einem schwarzen Kreuz durchschnitten sieht, ehe die Drehung beginnt, so nimmt die Helligkeit bei der Drehung bis 90° fortwährend ab und wird dann Null, so dafs man das Ringsystem mit weifsem Kreuz gar nicht erblickt. Bei

schneller Drehung sieht man daher ein Ringsystem mit schwarzem Kreuz.

11. Dafs dies der Grund der Erscheinung ist, geht daraus hervor, dafs, wenn man das auf den rotirenden Nicol einfallende Licht circular polarisirt, man die Erscheinungen eines unpolarisirt austretenden Lichtes erhält, ist hingegen das einfallende Licht elliptisch polarisirt, eines sehr schwach theilweise polarisirten. Im ersten Falle kann man sich das circulare Licht bestehend vorstellen aus zwei Bündeln gleicher Intensität, die rechtwinklig auf einander polarisirt sind, und in ihrem Gange um den vierten Theil einer Undulation verschieden sind, im letzten als zusammengesetzt aus circularem und linearem.

Die eben angeführten Versuche [1]) bilden den Uebergang zu einer interessanten Reihe von Erscheinungen, welche aus der Combination der Phänomene entstehen, welche bei der Rotation als Resultante nicht weifses Licht geben, sondern die Erscheinungen des circularen, elliptischen und geradlinig polarisirten Lichts in ihren Verbindungen mit natürlichem.

12. Dreht man die linear polarisirende und analysirende Vorrichtung mit gleicher Geschwindigkeit nach entgegengesetzter Richtung, so sieht man das Ringsystem, welches man erhält, wenn beide im Zustand der Ruhe im Azimuth 45° gegen einander aufgestellt sind. Besonders deutlich zeigt sich dies bei monochromatischer Beleuchtung einer durch Kochsalz gelbgefärbten Weingeistflamme. Der Grund dieser im ersten Augenblick auffallenden Erscheinung erhellt sogleich, wenn man bedenkt, dafs, wenn nur eine Vorrichtung rotirt, die analysirende oder die polarisirende, bei einem ganzen Umlauf zwei Mal die Arme des weifsen Kreuzes an dieselbe Stelle fallen als die des schwarzen, und ebenso die dunkeln Interferenzlinien mit den hellen Coincidenzlinien nach einander genau an derselben Stelle wechseln. Rotiren hingegen beide Vorrichtungen nach entgegengesetzter Richtung, so fällt das Ringsystem mit dem weifsen Kreuz auf die Punkte 0°, 90°, 180°, 210°, während das Ringsystem

[1]) Eine nähere theoretische Ableitung derselben hat Stokes gegeben: *on the composition and resolution of streams of polarized light from different sources. Trans. of the Cambr. Phil. Soc.* vol. IX. p. III.

mit dem schwarzen Kreuz den Punkten 45°, 135°, 225°, 315° entspricht. Da die hellen Arme des weifsen Kreuzes mit den farbigen Zwischenräumen des dunkeln zusammenfallen, so addiren sich die Eindrücke beider, und man erhält die angegebene Erscheinung. Ist die Umdrehungsgeschwindigkeit beider Rollen genau dieselbe, so erscheint die Figur feststehend, ist sie hingegen etwas verschieden, so dreht sich die Figur langsam, weil die Coincidenzpunkte allmählig sich ändern.

13. Dreht man die linear polarisirende und analysirende Vorrichtung schnell mit gleicher Geschwindigkeit nach derselben Richtung, so verwandelt sich das lineare Ringsystem in das, welches man erhält, wenn ohne Rotation circular polarisirtes Licht circular analysirt wird. Stehen die Nicols vor Beginn der Drehung so, dafs man im Kalkspath das schwarze Kreuz sieht, so erhält man bei der Drehung die Newton'schen reflectirten Ringe mit schwarzem Mittelpunkt ohne Kreuz, sieht man hingegen bei dem Zustand der Ruhe das weifse Kreuz, so erhält man bei der Rotation die durchgelassenen Ringe mit weifsem Mittelpunkt. Drehen sich die polarisirende und analysirende Vorrichtung nicht mit gleicher Geschwindigkeit, so sieht man die sonderbare Erscheinung, dafs die reflectirten Newton'schen Ringe mit schwarzem Mittelpunkt und die durchgelassenen mit weifsem Mittelpunkt fortwährend in bestimmten Zeitintervallen mit einander an derselben Stelle des Gesichtsfeldes abwechseln.

14. Dreht man die circular polarisirende Vorrichtung und läfst die linear analysirende stehen, so erhält man bei jeder Geschwindigkeit die in den Quadranten absetzenden Ringsysteme genau so bei der Drehung als bei der Ruhe. Eben so hat es keinen Einflufs auf die Erscheinung, ob eine circular polarisirende und circular analysirende Vorrichtung in gleichem oder entgegengesetztem Sinne gedreht werden, oder beide stillstehen. Dies ist eben das Charakteristische der Circularpolarisation. Dreht man aber eine circularpolarisirende Vorrichtung in entgegengesetztem Sinne als die linearanalysirende, so erhält man schwächer dieselbe Erscheinung, als wenn man eine linearpolarisirende und linearanalysirende in entgegengesetzter Richtung dreht (12).

15. Läfst man die circularpolarisirende Vorrichtung stehen

und dreht die linearanalysirende, so erhält man ein schwaches Ringsystem ohne Kreuz mit einem grauen, von einem dunkleren Kreise umgebenen Mittelpunkt. Der Sinn der Rotation ist dabei gleichgültig.

16. Dreht man die circularpolarisirende Vorrichtung in demselben Sinn wie die linearanalysirende, so erhält man dieselbe Erscheinung schwächer, welche man sieht, wenn man eine linearpolarisirende und eine linearanalysirende Vorrichtung in demselben Sinne dreht, bei nicht gleicher Rotationsgeschwindigkeit daher die alternirenden Ringsysteme (13).

17. Dreht man zwischen den stehenbleibenden Nicols das die circulare Polarisation im Azimuth 45° gebende Glimmerblättchen der polarisirenden Vorrichtung, so erhält man als Resultante aller Erscheinungen des elliptischen, circularen und geradlinig polarisirten Lichtes, bei linearer Analyse die Erscheinungen des theilweise geradlinig polarisirten Lichts, bei circularer Analyse die einer Mischung natürlichen und circularen Lichtes, d. h. im ersten Falle das Ringsystem mit einem dunkeln Kreuz, im letzten die in den Quadranten verschobenen Ringe, aber matt. Bei allen Versuchen waren die Nicols gekreuzt, ehe die Rotation begann.

18. Es ist so schwierig, vermittelst eines Schnurlaufes zwei Glimmerblättchen oder zwei Nicols entweder in eine genau gleiche oder genau entgegengesetzte Drehungsgeschwindigkeit zu versetzen, dafs bei den Versuchen, wo bei stehendbleibenden Nicols die Glimmerblättchen rotiren, oder bei stehendbleibenden Glimmerblättchen die Nicols, immer die Stellung der Blättchen oder der Nicols gegen einander sich etwas veränderte, und daher die Phänomene des elliptischen Lichtes sich stets mit denen des circularen vermischten. Für diese Erscheinung müfste daher die Drehung durch Räderwerke geschehen.

19. Gekühlte Gläser zwischen feststehenden Nicols in ihrer Ebene rotirend, neutralisiren sich eben so wenig zu Weifs, als Platten zweiachsiger Krystalle, welche um die Halbirungslinie ihrer optischen Achsen als Drehungsachse gedreht werden.

## 3. Darstellung des Weifs durch Uebereinanderlegen complementarer Bilder.

Während bei den bisherigen Versuchen die Vorstellung des Weifs dadurch hervorgerufen wird, dafs die Netzhaut nach einander den Eindruck complementarer Farben empfängt, kann diese Vorstellung auch dadurch entstehen, dafs wir gleichzeitig an derselben Stelle die complementaren Farben ununterbrochen sehen. Die homogenen prismatischen Farben verhalten sich zu den unreinen Pigmenten bei dem Uebereinanderlegen genau so wie bei der Drehung. Eben so wenig wie auf dem gewöhnlichen Farbenkreisel aus den bemalten Sectoren ein reines Weifs entsteht, eben so wenig kann hier aus der innigen Mischung farbiger Pulver dieses hervortreten. Aber so wie dort das oscillirende Prisma das Weifs wirklich darstellt, so tritt dies eben so deutlich an den Stellen hervor, welche nach Aufsen in weifser Beleuchtung den äufserten Ring der Newton'schen Farbenringe begrenzen. Hier erscheint in homogener Beleuchtung noch eine Unzahl von hellen und dunkeln Ringen, und es wäre widersinnig, die Erklärung, welche vollkommene Rechenschaft für die Farben der Mitte der Ringe giebt, deswegen aufzugeben, weil sie für die äufseren Ringe auf Weifs führt. Dasselbe gilt für die in weifser Beleuchtung in einer bestimmten Entfernung von der Mitte der isochromatischen Curven bei Polarisationsversuchen nicht sichtbaren Curven, die in homogener Beleuchtung mit der gröfsten Bestimmtheit hervortreten. Hieher gehören auch die weifsen Ringe um die Achse des Apophyllit.

Versteht man unter prismatischer Achromasie alle die Methoden, vermittelst deren durch Dispersion entwickelte Farben wiederum in der Weise vereinigt werden, dafs sie den Eindruck des Weifsen hervorrufen, so werden sie im Allgemeinen unter folgende drei sich zusammenfassen lassen:

1. Die homogenen Farben treten durch Brechung noch nicht vollständig aus einander, sondern fallen an bestimmten Stellen noch über einander. Dies ist die weifse Mitte des Spectrums einer grofsen Oeffnung.

2. Die bereits getrennten homogenen Farben werden auf irgend eine Weise sämmtlich auf dieselbe Stelle projicirt. Hieher gehört:

*a*) Das Verfahren von Wünsch [1]), die Spectra verschiedener Prismen, welche aus derselben Glassorte unter gleichen Winkeln geschliffen sind, auf dieselbe Stelle zu werfen.

*b*) Das in Pouillet *traité*, 2 *edit.*, II, p. 294, beschriebene, durch kleine Metallspiegel die verschiedenen Farben desselben Spectrums an einer Stelle zu vereinigen.

*c*) Dasselbe Verfahren vermittelst eines grofsen Hohlspiegels (Muschenbroek, *Introd. ad ph. nat.*, §. 1817.)

*d*) Dasselbe vermittelst einer Sammellinse (Newton, *Optice*, I. prop. V, theor. 4, exp. 10.

*e*) Der Newton'sche Versuch, die neben einanderfallenden Spectra vieler parallelen Spalten durch Entfernen derselben vom Prisma zum Decken zu bringen.

3. Die gegen einander geneigten Strahlen der verschiedenen homogenen Farben werden parallel gemacht:

*a*) vollständig, indem zwei gleiche Prismen mit nach entgegengesetzten Seiten gekehrten Winkeln die Wirkung eines Parallelglases hervorbringen;

*b*) vollständig, indem man das objective, auf die Wand projicirte Spectrum subjectiv durch ein zweites gleiches Prisma betrachtet, dessen Brechungswinkel nach derselben Seite gekehrt ist (Newton, *Optice*, l. II, prop. V, exp. 11), oder indem man (Goethe, Farbenlehre I, S. 136) dasselbe Prisma subjectiv benutzt, welches das objective Spectrum erzeugt;

*c*) unvollständig durch achromatische Prismen und Objectivlinsen von verschiedenen Glassorten;

*d*) unvollständig durch achromatische Oculare, in welchen die Wirkung einer biconvexen Linse ersetzt wird durch zwei von einander getrennte Convexlinsen derselben Glassorte.

[1]) Versuche über die Farben des Lichtes, 1792.

Die dritte Methode unterscheidet sich von der zweiten dadurch, dafs die Achromasie der zweiten nur am Kreuzungspunkte der Strahlen stattfindet, die der letzteren hingegen überall, wo das austretende Licht aufgefangen wird.

Dieselben Methoden lassen sich ziemlich in gleicher Weise für die Polarisationsfarben anwenden.

Der ersten Methode entspricht genau die weifse Mitte der durch einen doppelbrechenden Körper nicht vollständig getrennten Bilder einer von polarisirtem Licht beleuchteten Oeffnung, deren getrennte Ränder nach Einschaltung eines Gypsplättchens mit den lebhaftesten Complementarfarben erscheinen. Die Erscheinung tritt in gleicher Weise, aber complicirter, an den vier Bildern einer Oeffnung hervor, durch welche natürliches Licht einfällt und im Innern eines Bergkrystallprismas total reflectirt wird, wenn man das austretende Licht nach eingeschalteten Gypsplättchen durch einen Nicol analysirt.

Zu der zweiten Methode müssen alle die Fälle gerechnet werden, wo von vier entstehenden Bildern zwei complementare zusammenfallen, welche aber in der That bereits gesondert waren. Am einfachsten erhält man dies, wenn man zwei gleich grofse Längenspalten so vor einen doppelbrechenden Krystall aufstellt, dafs die mittleren Bilder einander genau decken. Die bei Einschaltung des Krystallplättchens complementar gefärbt im Nicol erscheinenden Seitenbilder stehen gleich weit ab von dem weifsbleibenden Bilde in ihrer Mitte. Entfernt man sich etwas, so löst sich diese sogleich in zwei complementare Bilder auf. Dasselbe Phänomen zeigt sich deutlich in den idiocyclophanischen Krystallen, z. B. im Arragonit. Das eingeschlossene Krystall-Individuum vertritt die Stelle des dünnen Plättchens, die hintere Seite des umschliefsenden Individuums giebt die polarisirende Vorrichtung, die andere die analysirende. Da diese aber selbst zwei Bilder giebt, so bedarf es nur einer Oeffnung, die, durch den Zwilling aus bestimmter Entfernung betrachtet, farblos in der Mitte zweier complementar gefärbter Nebenbilder erscheint. Da die krystallographischen Achsen beider Individuen parallel liegen, so entsteht die Erscheinung einfach dadurch, dafs die durch die optischen Achsen gelegte Ebene des inneren einen

Winkel bildet mit der durch die optischen Achsen des einschliefsenden Individuums gelegten. Läfst man polarisirtes Licht durch ein Gypsplättchen gehen, und fängt es dann auf einen Hohlkegel auf, der natürliches, seiner Achse parallel einfallendes, in allen Ebenen polarisiren würde, so ist das in einem Punkte der Achse concentrirte Licht weifs. Dies ist das Analogon zu dem prismatischen Weifs des Hohlspiegels.

Wenn das Wesen der dritten Methode prismatischer Achromasie darin besteht, dafs Farben, welche durch eine bestimmte Vorrichtung entstanden sind, dadurch wieder verschwinden, dafs dieselbe Vorrichtung in entgegengesetzter Weise auf diese entstandenen Farben wiederum angewendet wird, so giebt folgender Versuch aus dem Gebiete der Complementarfarben dazu ein Analogon.

Das durch Reflexion von einem Spiegel vollständig polarisirte Licht ging zuerst durch ein gekühltes Glas und dann durch zwei Glassätze hindurch, von denen die Brechungsebene des einen in der Spiegelungsebene des polarisirenden Spiegels lag, die des anderen senkrecht darauf. Wenn jede der beiden analysirenden Vorrichtungen so gegen den einfallenden Strahl geneigt ist, dafs sie einen unpolarisirt einfallenden gleich stark polarisiren würde, so erscheint das gekühlte Glas vollkommen farblos. Bei der geringsten Veränderung der einen oder der andern Vorrichtung, entweder durch Neigung oder durch Hinzufügung einer neuen Glasscheibe, treten sogleich die complementaren Bilder hervor, je nachdem die eine oder die andere analysirende Vorrichtung überwiegt. Dies giebt ein sehr einfaches Mittel ab, zwei auf einfache Brechung gegründete Polarisationsapparate in Beziehung auf ihre Wirksamkeit mit einander zu vergleichen, und die von Brewster aufgestellten Sätze über Abhängigkeit der Polarisation von Anzahl der Scheiben, Brechkraft derselben und Incidenz des Lichtes darzulegen.

Ich füge diesen Versuchen noch einige hinzu, welche, obgleich nicht zur Polarisation gehörig, sich unmittelbar an die vorhergehenden anschliefsen. Wie sich Complementarfarben erregt auf den Netzhäuten beider Augen verhalten, ist unter den stereoskopischen Versuchen, pag. 111, bereits erwähnt worden. Es mögen daher hier nur die folgenden noch eine Stelle finden.

## 4. Darstellung des Weifs durch Uebereinanderlegen objectiver und subjectiver Farben.

Auf das glänzende Knöpfchen eines Kaleidophon liefs ich das Licht einer Kerze fallen und regulirte durch allmähliges Schliefsen der Fensterladen das Tageslicht so, dafs neben dem orangegelben, durch Reflex der Kerze entstehenden Lichtpunkt ein gleich heller von weifsem Tageslicht fiel. Ich setzte nun den Stab, welcher das Knöpfchen trug, in schwingende Bewegung, und erhielt auf diese Weise zwei genau gleiche Lichtlinien, eine objectiv orange, die andere prachtvoll blau subjectiv gefärbt. Die Durchschnittspunkte dieser Curven schienen mir nicht vollständig weifs, auch Hrn. Plateau nicht, dem ich vor mehreren Jahren diesen Versuch zeigte, welchen Hr. Radicke, Optik, II, S. 456, bereits als von mir angestellt angeführt hat.

## 5. Darstellung des Grau durch Absorption vermittelst gefärbter Gläser.

Es ist klar, dafs wenn man durch gleichmäfsige Absorption der verschiedenen Theile des Spectrums auf weifses Licht wirkt, das resultirende Licht ein getrübtes Weifs sein mufs. Dies habe ich nie durch Combination zweier Gläser erhalten, aber sehr gut durch Combination eines bläulichgrünen, gelben und violetten. Bei Tage erscheint die Trübung durchaus farblos, so intensiv auch die Färbung der einzelnen Gläser ist, bei dem Licht einer Lampe zieht sie hingegen etwas in ein schmutziges Grün. Da das Spectrum einer solchen Lampe ein anderes ist, als das des weifsen Tageslichts, so mufs natürlich eine Combination, welche für weifse Beleuchtung farblos ist, für eine gefärbte es zu sein aufhören.

Die Versuche über circulare Polarisation wollen wir in einem besondern Abschnitt von den bisherigen über lineare trennen.

# IV. Versuche über Circularpolarisation des Lichtes.

(Pogg. Ann. 35, p. 579).

## 1. Darstellung derselben durch gepreſste Gläser.

Wenn zwei senkrecht auf einander polarisirte Wellensysteme gleicher Intensität, welche in derselben Richtung sich fortpflanzen, in ihrem Gange um eine ungerade Anzahl von Viertelundulationen sich unterscheiden, so werden die Theilchen in dem daraus resultirenden Wellensysteme um ihre Gleichgewichtslage kleine Kreise, und zwar mit gleichförmiger Geschwindigkeit beschreiben, d. h. das Licht wird circular polarisirt sein. Jedes Mittel, diesen beiden Bedingungen zugleich zu genügen, nämlich der der gleichen Intensität der auf einander senkrecht polarisirten Wellensysteme und der des bestimmten Gangunterschiedes von einer ungeraden Anzahl von Viertelundulationen, wird daher eine Methode abgeben, das Licht circular zu polarisiren.

Fresnel und Airy haben auf verschiedenen Wegen dies geleistet. Die dritte Art, welche ich hier auseinandersetzen werde, ist in der Ausführung wenigstens eben so bequem als die bisherigen, giebt aufserdem näheren Aufschlufs über die Erscheinungen gepreſster und gekühlter Gläser im polarisirten Lichte.

Der Bedingung der gleichen Intensität der senkrecht auf einander polarisirten Systeme entspricht Fresnel dadurch, dafs er das einfallende Licht in einer Ebene polarisirt, welche mit der Ebene der totalen Reflexion in einem Glasparallelopiped einen Winkel von 45° oder 135° macht. Die in der und senkrecht auf die Reflexionsebene polarisirten Lichtmengen werden nämlich dann nach der Fresnel'schen Intensitätsformel einander gleich. Den Phasenunterschied von einer Viertelundulation erhält er aber durch zweimalige totale Reflexion, weil nach einmaliger unter den gegebenen Umständen die Vibrationsperioden der reflectirten Wellen nicht mehr coincidiren, sondern einen Phasenunterschied von $\frac{1}{8}$ Undulation zeigen.

Airy's Verfahren beruht auf einem andern Princip. Betrachtet man ein parallel der Achse geschnittenes Blättchen eines einachsigen Krystalls, dessen Achse mit der Polarisationsebene des einfallenden Lichtes einen Winkel $a$ macht, durch ein Kalkspathrhomboëder, dessen Hauptschnitt unter dem Winkel $b$ gegen die Ebene der primitiven Polarisation geneigt ist, so ist, wenn $I_o$, $I_e$ die Intensitäten der beiden senkrecht auf einander polarisirten Bilder bezeichnen, allgemein:

$$I_o = \cos^2 b - \sin 2a \sin 2(a-b) \cos^2 \pi \left(\frac{o-e}{\lambda}\right)$$

$$I_e = \sin^2 b + \sin 2a \sin 2(a-b) \sin^2 \pi \left(\frac{o-e}{\lambda}\right),$$

wo $\lambda$ die Undulationslänge für eine bestimmte Farbe, $o-e$ der Gangunterschied der beiden Strahlen und 1 die Intensität des auf das Krystallblättchen senkrecht auffallenden polarisirten Lichtes bezeichnet. Läfst man nun die Achse des Blättchens einen Winkel von 45° mit der Ebene der primitiven Polarisation machen, d. h. setzt man $a = 45°$, so wird:

$$I_o = \cos^2 b - \cos 2b \cos^2 \pi \left(\frac{o-e}{\lambda}\right)$$

$$I_e = \sin^2 b + \cos 2b \sin^2 \pi \left(\frac{o-e}{\lambda}\right).$$

Kann man nun durch irgend ein Mittel den Gangunterschied der beiden Strahlen einer ungeraden Anzahl von Viertel-Undulationen gleich machen, so wird der zweiten Bedingung entsprochen, zugleich aber auch der ersten, nämlich der der gleichen Intensität. Setzt man nämlich:

$$o - e = \left[\left(\frac{2n-1}{4}\right)\lambda\right],$$

so wird:

$$I_o = \cos^2 b - \tfrac{1}{2} \cos 2b = \tfrac{1}{2}$$
$$I_e = \sin^2 b + \tfrac{1}{2} \cos 2b = \tfrac{1}{2}.$$

Der Gangunterschied $o-e$ hängt von zwei Gröfsen ab, von der Dicke des Blättchens, welcher er direct proportional ist, und von dem Unterschied der Geschwindigkeiten der beiden das Blättchen durchlaufenden Strahlen, d. h. von den Constanten der Doppelbrechung.

Das Verfahren von Airy besteht nun darin, dafs er bei gleichbleibender Doppelbrechung die Dicke des Blättchens durch Spalten so lange ändert, bis der Gangunterschied beider Strahlen gleich ist einem ungeraden Vielfachen von Viertel-Undulationen. Da für den zweiachsigen Glimmer unter senkrechter Incidenz dasselbe gilt wie für einen einachsigen Krystall, und er das Spalten in gröfsere Blättchen am besten gestattet, so wird er dazu vorzugsweise anwendbar sein. Ich ändere hingegen bei gleichbleibender Dicke die Doppelbrechung der Substanz, bis der verlangte Gangunterschied erhalten wird.

In einem Krystallblättchen durch Druck oder Temperaturänderung die Strahlenbrechung so abzuändern, dafs es bei einer gegebenen Dicke die verlangte Wirkung äufsere, möchte in der Anwendung keine bequeme Vorrichtung abgeben. Sehr leicht ist es aber, einen unkrystallisirten Körper durch Druck oder Abkühlung in einen doppelbrechenden zu verwandeln, welcher grade die verlangte Wirkung äufsert.

In dem von Fresnel angegebenen, aus vier Prismen bestehenden Apparate, durch welchen die Doppelbrechung des gepreſsten Glases direct nachgewiesen wird, ist von den beiden entstehenden Bildern das eine parallel der Compressionsachse, das andre senkrecht auf dieselbe polarisirt, woraus hervorgeht, dafs die Achse der doppelten Strahlenbrechung mit der Compressionsachse zusammenfällt. Wenn man eine quadratische oder kreisrunde Glasscheibe daher so zusammendrückt, dafs die Compressionsachse mit der Ebene der primitiven Polarisation einen Winkel von 45° oder 135° macht, so wird das durch die Mitte der Scheibe hindurchgehende Licht bei einem gewissen Grade der Zusammendrückung circular polarisirt sein. Denken wir uns nun eine Kreistheilung lothrecht auf den einfallenden Strahl so gelegt, dafs die Polarisationsebene durch die Punkte 90° und 270° hindurchgeht, so zeigt, wenn die Compressionsachse durch 45° und 225° geht, eine senkrecht auf die Achse geschnittene Kalkspathplatte in dem durch die Mitte des gepreſsten Glases gehenden Lichte statt des schwarzen Kreuzes die Ringe im zweiten und vierten Quadranten (rechts oben und links unten) um ein Viertelintervall vom Mittelpunkt fortgeschoben, im ersten

und dritten Quadranten hingegen (links oben und rechts unten) dem Mittelpunkt um dieselbe Gröfse näher gerückt. Grade das Umgekehrte findet statt, wenn die Compressionsachse durch die Theilungspunkte 135° und 315° geht.

Man sieht hieraus, dafs die Winkel, welche in dem Fresnelschen Parallellopiped die Ebene der zweimaligen totalen innern Reflexion mit der Ebene der primitiven Polarisation macht, gleich sein müssen den Winkeln, unter welchen die auf die Compressionsachse lothrechte Ebene gegen die der primitiven Polarisation geneigt ist, wenn durch beide Vorrichtungen dieselben Erscheinungen hervorgebracht werden sollen.

Es bedarf nun weiter keiner besonderen Ableitung, dafs bei einer ganzen Umdrehung der Platte in ihrer Ebene um den lothrecht einfallenden Strahl als Drehungsachse das Licht viermal geradlinig und viermal circular polarisirt sein wird, und zwar geradlinig, wenn der Angriffspunkt der zusammenpressenden Schraube in den Punkten 0°, 90°, 180°, 270° liegt, d. h. wenn die Compressionsachse senkrecht auf der Ebene der primitiven Polarisation steht oder in ihr liegt, hingegen circular, wenn jener Angriffspunkt den Theilungspunkten 45°, 135°, 225°, 315° entspricht, wobei 45° und 225°, so wie 135° und 315° gleiche Wirkung zeigen.

Combinirt man zwei gepreſste Platten und zwei Turmalinplatten so, dafs die auf einander senkrechten Compressionsachsen der zwischen den gekreuzten Turmalinplatten befindlichen Glasplatten mit deren Achsen Winkel von 45° bilden, so zeigt eine zwischen die Glasplatten gelegte Kalkspathplatte die Ringe ohne Kreuz mit dem schwarzen Fleck in der Mitte, hingegen die complementaren, wenn man die Achsen der Turmaline oder die Compressionsachsen der Glasplatten einander parallel macht. Macht man eine Compressionsachse einer Turmalinplatte parallel, so erhält man die Verschiebung der Ringe in den vier Quadranten um ein Viertelintervall, die Erscheinung ist hierbei aber nicht reciprok, da hier eine ähnliche Umkehrung stattfindet als die, welche eintritt, wenn man einen kreisförmig geschlossenen electrischen Strom von der entgegengesetzten Seite ansieht; der erste und dritte Quadrant wird dann nämlich der zweite und vierte,

und umgekehrt. Macht man die Turmalinachsen und Compressionsachsen sämmtlich einander parallel, so erhält man die Erscheinungen im linear polarisirten Lichte.

Stellt man eine bis zu einem gewissen Grade zusammengepreſste runde oder quadratische Glasscheibe so zwischen die gekreuzten Spiegel, daſs die Compressionsachse mit einer der Reflexionsebenen der Spiegel zusammenfällt, so erblickt man auf ihr ein schwarzes Kreuz mit weiſsen Räumen in den Ecken. Untersucht man vermittelst der Kalkspathplatte diese vier weiſsen Räume, so findet man, daſs die derselben Diagonale angehörigen sich gleich verhalten, aber entgegengesetzt den beiden weiſsen Räumen der andern, und zwar ist das aus ihnen austretende Licht in der einen Diagonale rechts, in der andern links circular polarisirt. Daraus folgt unmittelbar, daſs wenn man die Platte in ihrer Ebene um 90° dreht, alle weiſsen Räume in den Diagonalen ihre Wirkung grade vertauscht haben.

Die von mir bei diesen Versuchen angewendeten Platten hatten einen Durchmesser von 11 1/2 Linie und eine Dicke von 3 1/4 Linie.

## 2. Darstellung der Circularpolarisation durch gekühlte Gläser.

Einen Glaswürfel von 17 Linien Seite kühlte ich vorsichtig so ab, daſs er zwischen den gekreuzten Spiegeln in der Mitte ein dunkles Kreuz und in den vier Ecken nur das daran grenzende Weiſs gab, wenn die Diagonalen der dem Auge zugekehrten Fläche des Würfels Winkel von 45° mit der Polarisationsebene machen. Das Licht der vier weiſsen Räume verhielt sich grade so wie das Licht der vier weiſsen Räume der gepreſsten Scheibe, wenn die Compressionsachse derselben in der Polarisationsebene oder senkrecht auf sie lag. Durch excentrische Drehung des Würfels, um den durch einen der weiſsen Räume senkrecht austretenden Strahl als Drehungsachse, entstehen daher ähnliche Verwandlungen, indem bei 90° Drehung die Diagonalen ihre Wirkung vertauschen. Statt den Würfel zu drehen, kann man ihn, um dieselbe Veränderung zu er-

halten, auch so verschieben, dafs zwei der parallelen Seiten der dem Auge zugekehrten Fläche senkrecht auf ihre Richtung sich fortbewegen, während die beiden andern in ihrer eignen Verlängerung fortrücken. Man kommt hierbei aus dem weifsen Raume der einen Diagonale in den der andern. Die Combinationen zweier gekühlter Gläser, um circular polarisirtes Licht circular zu analysiren, ergeben sich von selbst. Soll das Ringsystem ohne Kreuz mit dem schwarzen Fleck in der Mitte erhalten werden, so combinirt man sie wie in Fig. 16.

Da es sehr schwierig ist, durch directe Versuche die Doppelbrechung des gekühlten Glases nachzuweisen, und da sie in der Theorie der sogenannten beweglichen Polarisation nicht als eine nothwendige Folge seiner Farbenerscheinung im geradlinig polarisirten Licht angesehen wurde, so ist es wünschenswerth, die Beweise, dafs diese Farben durch den Gangunterschied der das Glas durchlaufenden Strahlen entstehen, durch neue Versuche zu verstärken. Die folgenden scheinen mir für die Erklärung dieser Farben aus dem Interferenzprincip daher nicht unwichtig.

Wenn ein im Azimuth 45° geradlinig polarisirter Strahl nach zweimaliger totaler Reflexion im Innern eines Fresnelschen Parallellopiped zwischen den senkrecht auf einander polarisirten Lichtmengen gleicher Intensität einen Phasenunterschied von $\frac{1}{4}$ Undulation zeigt, so wird dieser Unterschied nach viermaliger Reflexion $\frac{1}{2}$ Undulation werden, der Strahl also wieder geradlinig, aber senkrecht auf die Ebene der primitiven Polarisation polarisirt sein. Nach sechsmaliger Reflexion ist er wieder circular, aber links, wenn er es bei zweimaliger rechts war, weil das Azimuth des geradlinig polarisirt einfallenden Lichtes jetzt $-45°$ statt $+45°$, endlich wird nach achtmaliger Reflexion die Ebene der wieder hergestellten Polarisation mit der der primitiven zusammenfallen. Die Erklärung der in den oben angeführten Versuchen beobachteten Erscheinungen der Circularpolarisation beruhte darauf, dafs durch Aenderung der Doppelbrechung vermittelst einer bestimmten Wärmeverschiedenheit im Innern des angewendeten Körpers, bei unveränderter Dicke desselben, der Gangunterschied der beiden Strahlen grade $\frac{1}{4}$ Un-

dulation gleich gemacht wird. Ist diese Erklärung richtig, so mufs man durch allmähliges Erwärmen genau dieselben Erscheinungen erhalten, als durch successive Reflexionen im Innern Fresnel'scher Rhomboëder, nur mit dem Unterschiede, dafs statt sprungweiser Verschiedenheit man hier einen continuirlichen Uebergang durch alle Grade der elliptischen Polarisation zu erwarten hat. Die Versuche bestätigen dies nun vollkommen. Sie müssen natürlich im einfachen Lichte angestellt werden.

### 3. Erscheinung während des Erhitzens oder Abkühlens der Gläser.

Der in dem vorhergehenden Abschnitt näher beschriebene Apparat, Fig. 8, wurde nach einer monochromatischen gelben Lampe gerichtet, so dafs die in *l* befindliche, auf die Achse senkrecht geschnittene Kalkspathplatte die schwarzen Ringe mit dem dunkeln Kreuz in voller Deutlichkeit zeigte, wenn der durch neues Erwärmen und Abkühlen zur vollkommenen Wirkungslosigkeit auf das polarisirte Licht gebrachte Glaswürfel vor dem polarisirenden Nicol'schen Prisma, also zwischen *k* und *o*, eingeschaltet wurde. Um ihn bequem über einer Lampe zu erhitzen, war das dreiseitige Prisma *bc*, der Träger aller polarisirenden Vorrichtungen, so in seine Hülse gesteckt, dafs diese nicht über, sondern neben der Stange sich befanden, man mufs sich die Lage derselben in der Zeichnung daher um 120° geändert denken. In dem Ring *m* war ein Faden ausgespannt, um die Bewegung der Ringe vom Mittelpunkt weg oder zu ihm hin leichter beobachten zu können.

Als die Lampe angezündet wurde, fing das schwarze Kreuz an, sich sogleich in der Mitte zu öffnen, die Kreisbogen im zweiten und vierten Quadranten entfernten sich vom Mittelpunkt, während die des ersten und dritten sich näherten. Nach einiger Zeit entsprachen die dunkeln Bogen der ungeraden Quadranten genau den hellen Räumen der geraden, das Licht war circular polarisirt, der Gangunterschied $\frac{1}{4}$ Undulation. Während dieses Vorgangs war, aufser den schwarz bleibenden Punkten aus der

Mitte, das dunkle Kreuz immer heller geworden. Als es völlig verschwunden war, hatten die Bogen, an ihren Enden sich verkürzend, allmählig sich so fortbewegt, dafs die zwei von dem Centrum ausgegangenen schwarzen Flecke mit den sich nähernden Theilen aus den beiden andern Quadranten den durch vier helle Zwischenräume getrennten innern Ring bildeten. Alle übrigen Ringe verhielten sich eben so; die Kalkspathfigur hatte sich also gerade so umgestaltet, als wenn das polarisirende Prisma um 90° gedreht worden wäre, das Licht war also linear und senkrecht auf die Ebene der primitiven Polarisation polarisirt, der Gangunterschied der beiden Strahlen $^1/_2$ Undulation. Bei weiterer Erwärmung, als der Gangunterschied $^3/_4$ Undulationen geworden, war das Licht wieder circular polarisirt, nur mit dem Unterschiede, dafs nun die Ringe im ersten und dritten Quadranten die nähern waren, die im zweiten und vierten die entferntern, wobei die Richtung der Bewegung der Bogen in den einzelnen Quadranten natürlich dieselbe blieb. Endlich als der Gangunterschied eine ganze Undulation betrug, hatte sich das weifse Kreuz wieder zu vollkommenem Schwarz verdunkelt; die vorher getrennten Bogen schlossen sich zu ganzen Kreisen, das Licht war nach derselben Richtung geradlinig polarisirt als zu Anfang des Versuches. Nun wurde die Lampe entfernt, und die entgegengesetzten Erscheinungen in regelmäfsiger Folge während des Erkaltens beobachtet [1]).

Die Einwirkung des allmählig von Unten nach Oben sich erwärmenden Glases auf das einfallende Licht ist demnach fol-

[1]) Ganz dieselbe Reihenfolge von Erscheinungen läfst sich natürlich auch durch allmählig gesteigerten Druck und Nachlassen desselben hervorbringen. Bei den von mir angewandten Scheiben konnte ich diesen in der Nähe des Angriffspunkts der Schraube aber nur bis zu einem Gangunterschied von $^3/_4$ Undulation treiben. Bei stärkerem Druck platzten die Scheiben. Eben so ist es einleuchtend, dafs wenn man eine gekühlte Glasscheibe, welche im weifsen Licht, vom Schwarz ausgehend, regelmäfsige Farbenfolgen zeigt, einschaltet, im einfachen Licht in der Kalkspathplatte dieselben Erscheinungen wahrgenommen werden, wenn man die Platte vor der Oeffnung des polarisirenden Prismas langsam vorbei bewegt. Die verschieden wirkenden Räume liegen, je dicker die Platte ist, einander desto näher.

gende. Die zuerst geradlinig schwingenden Aethertheilchen fangen an in Ellipsen sich zu öffnen, deren Excentricität immer mehr abnimmt, bis sie Kreise werden. Die vorher grösere Achse wird nun die kleinere, und umgekehrt. Mit zunehmender Excentricität gehen die elliptischen Schwingungen in gerade über, welche senkrecht auf den anfänglichen stehn. Während dieses ganzen Vorganges änderte sich der Sinn der Schwingungen nicht, war er von links nach rechts, so bleibt er es. So wie aber die zweite geradlinige Schwingung in eine elliptische sich öffnet, hat der Sinn der Bewegung sich umgekehrt, die Schwingung geschieht nun von rechts nach links, wenn sie vorher von links nach rechts geschah. Die Vibrationen gehen dann durch kreisförmige wieder in die anfänglichen geraden über.

Das aus dem Würfel austretende Licht wurde nun dadurch, dafs ein Glimmerblatt *f* von passender Dicke zwischen der Kalkspathplatte und dem analysirenden Prisma eingeschaltet wurde, circular analysirt. Die Achse dieses Glimmerblattes lag so, dafs die Bogenstücke im ersten und dritten Quadranten vom Mittelpunkt entfernt waren, wenn der Würfel noch unerhitzt war, die Wirkung desselben war also grade entgegengesetzt der Wirkung des Würfels im ersten Stadium der Erwärmung. Wenn, von diesem Punkte ausgehend, die Ringe ohne Kreuz mit dem schwarzen Fleck in der Mitte sich gebildet hatten, so trennte sich dieser bei steigender Wärme in zwei Flecke, welche sich im zweiten und vierten Quadranten vom Mittelpunkt entfernten, und, nachdem sie durch die Figur im circularen Lichte hindurchgegangen waren, sich mit den herankommenden Bogen aus dem ersten und dritten Quadranten zu einem Kreis schlossen, also das Ringsystem mit heller Mitte gaben, welches man durch Drehung des polarisirenden Prisma um 90° gleich zu Anfang erhalten haben würde. Die weiter dem Mittelpunkt zuschreitenden Bogen aus dem ersten und dritten Quadranten bildeten dann die entgegengesetzte circulare Figur, und vereinigten sich zuletzt in der Mitte zu einem schwarzen Fleck, während alle Bogen zu Kreisen sich schlossen. Man wird in diesem Vorgang die früher beschriebenen Erscheinungen der linearen Analyse als bedingendes Element leicht wieder erkennen, ohne dafs es nöthig

wäre, die Formänderung der Ringe, ehe sie in getrennte Bogen aus einander brechen, näher zu beschreiben.

Circulares Licht einfallen lassen, heifst nichts anderes, als zu dem durch den erhitzten Würfel hervorgebrachten Phasenunterschied eine constante Gröfse, nämlich $\frac{2n-1}{4}$ oder $\frac{2n+1}{4}$ Undulationen hinzu addiren, d. h. den Ausgangspunkt des Versuches ändern. Als ich daher zwischen dem polarisirenden Prisma und dem erhitzten Würfel das Glimmerblättchen $g$ einschaltete, erhielt ich bei linearer Analyse die zuerst, bei circularer die zuletzt beschriebenen Erscheinungen von einem anderen Ausgangspunkt beginnend.

## 4. Erscheinungen in den verschiedenen Farben des Spectrums.

Die bisherigen Versuche wurden bei einfallendem einfachen Lichte angestellt, dessen Wellenlänge $\lambda$ war. Für einen anderen Theil des Spectrums hat aber $\lambda$ einen anderen Werth. Bezeichnen wir diesen mit $\lambda_1$, so wird, wenn:

$$o - e = m\lambda$$
$$o - e = m_1\lambda_1$$

sein, also:

$$m - m_1 = (o - e)\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_1}\right).$$

Da $\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_1}$ für eine bestimmte Substanz eine constante Gröfse ist, so wird der Unterschied $m - m_1$ der Gröfse $o - e$ proportional sein. Daraus folgt also:

> »Dafs, wenn für eine bestimmte Farbe das Licht durch ein eingeschaltetes Krystallblättchen circular polarisirt ist, es für die anderen Farben linear und entgegengesetzt circular polarisirt sein kann, und dafs der Unterschied zwischen den einzelnen Farben zunimmt mit der Dicke des Blättchens und mit der Intensität der Doppelbrechung.«

Ist das auffallende Licht für die Mitte des Spectrums circular, so ist, wenn der Gangunterschied $\frac{1}{4}$ für diese Mitte,

auch für die äufsersten Grenzen des Spectrums das Licht noch nicht linear. Ist es bei $^1/_2$ Undulation Gangunterschied im Rothen hier linear, so ist es im Blau circular. Bei $^3/_4$ Gangunterschied im Rothen wird es, wenn es hier rechts circular ist, im Blau linear und im äufsersten Violett links circular. Lineares Licht im Rothen durch den Gangunterschied 1, giebt links circulares im Grün, senkrecht darauf lineares im Indigo und nähert sich im äufsersten Violett dem rechts circularen, endlich links circulares im Roth durch den Gangunterschied $^5/_4$ giebt lineares im Gelb, rechts circulares, wo das Blau in Indigo übergeht, und darauf senkrecht lineares bei dem Beginn des Violett u. s. f.

Um dies durch Versuche zu prüfen, wurde ein gleichseitiges Prisma von Guinand'schem Flintglase so aufgestellt, dafs nach Wegnahme der Collectivlinse *p* das rothe Ende des Spectrum grade auf die Oeffnung *e* des polarisirenden Nicol'schen Prismas fiel. Hatte nun der Würfel bei allmähligem Erwärmen die Erscheinungen hervorgebracht, welche einem Gangunterschied von $^1/_4$, $^1/_2$, $^3/_4$ Undulation entsprachen, so wurden die andern Farbenstrahlen in die Achse des Polarisations-Apparates gebracht und die Veränderung der Kalkspathfigur untersucht. Dies konnte ohne Drehung des Prismas leicht erhalten werden, da vermittelst der Auszugsröhre die Höhe des Instruments, durch Bewegung der prismatischen Stange aber die Neigung desselben beliebig geändert werden kann. Glimmerblätter von verschiedener Dicke wurden ebenso wie der erhitzte Würfel untersucht. Am schönsten sieht man die Veränderungen, wenn man, vom Violett anfangend, das Instrument in der Auszugsröhre langsam durch die einzelnen Farben des Spectrums herabsinken läfst. Die allmähligen Uebergänge sind von einem Ende desselben zum andern, von dem Farbenunterschied abgesehen, genau dieselben als die bei dem Erhitzen und Abkühlen des Würfels erhaltenen.

Ebenso sind die Erscheinungen, wenn man das auffallende Licht durch ein vor dem Kalkspath eingeschaltetes Glimmerblatt circular analysirt, den früher beschriebenen durchaus ähnlich. Statt der einzelnen Theile des Spectrums kann man sich bei diesen Versuchen natürlich auch monochromatischer Lampen oder der Absorption durch farbige Gläser bedienen. Hat man durch

ein Blättchen von bestimmter Dicke in einer Farbe das Licht circular polarisirt, so läfst sich dadurch nur bestimmen, ob der Gangunterschied der beiden Strahlen $\frac{2n-1}{4}$, oder ob er $\frac{2n+1}{4}$ Undulation ist. Prüft man dasselbe Blättchen aber in den verschiedenen Theilen des Spectrums, so erhält man nach den eben erörterten Versuchen $n$ selbst bestimmt. Es versteht sich von selbst, dafs, wenn man durch Refraction Erscheinungen der Circularpolarisation im weifsen Lichte erhalten will, es anzurathen ist, die Dicke des Blättchens oder die Härtung des Glases so zu bestimmen, dafs der Gangunterschied für die mittleren Strahlen $\frac{1}{4}$ Undulation wird. Ich bediene mich zu dieser Bestimmung einer durch Kochsalz oder salpetersaures Natron gelb gefärbten Weingeistflamme.

## 5. Farbenerscheinungen combinirter Krystalle im weifsen Licht.

Es ist nun leicht, sich von den complicirten Farbenerscheinungen Rechenschaft zu geben, welche man erhält, wenn man hinter einer senkrecht auf die Achse geschnittenen Krystallplatte ein der Achse paralleles Krystallblättchen von beliebiger Dicke einschaltet. Da nämlich für eine Farbe das Licht rechts circular, für die andere links, für eine dazwischenliegende geradlinig polarisirt wird, so werden die schwarzen Büschel an ihren beiden Seiten sich verschieden färben, die Erscheinungen in den geraden Quadranten sich wesentlich unterscheiden von den in den ungeraden, die Farbenringe in beiden aber von der Farbenfolge der Newton'schen Ringe wesentlich verschieden sein. Aus den bekannten Werthen der Brechungsverhältnisse, der Wellenlänge für die einzelnen Theile des Spectrums und der Dicke des Blättchens läfst sich die Erscheinung vorher bestimmen; sie läfst sich aber auch empirisch nachweisen, wenn man durch Aufsetzen der Collectivlinse $p$ des Apparates das Spectrum in der Oeffnung des polarisirenden Nicol'schen Prisma $e$ zu Weifs concentrirt, eine Bestätigung, deren häufige Wiederholung wegen der Lichtstärke des Apparates aber nicht zu empfehlen ist.

## 6. Farbenerscheinungen in Zwillingskrystallen.

Gehen wir von der künstlichen Combination zweier Krystalle zu den in den zwillingsartigen Verwachsungen natürlich vorkommenden über, so haben wir diese in drei Klassen zu unterscheiden: entweder nämlich sind die Achsen der verbundenen Individuen lothrecht auf einander, oder sie sind einander parallel, oder machen irgend einen Winkel mit einander. Der Schnitt soll immer senkrecht gelegt sein auf die Achse des einen Individuum. Der erste Fall gäbe unmittelbar die eben betrachteten Erscheinungen, doch kommt er, so viel mir bekannt ist, bei durchsichtigen Krystallen nicht vor, während der zweite nur bei zweiachsigen Krystallen zu Farbenerscheinungen Veranlassung geben kann. Ist nämlich, wie z. B. bei dem Arragonit, ein sehr dünner Krystall in einem andern so eingewachsen, dafs seine krystallographische Achse parallel liegt der des von ihm in zwei Theile getheilten Krystalls, so werden diese, weil die optischen Achsen dieser Lamelle merkliche, wenn auch kleine, Winkel mit den Begrenzungsebenen machen, für das durch diese Achsen gehende Licht als doppelbrechende Prismen wirken müssen, weil ihre optischen Achsen nicht in der Ebene der Achsen der Lamelle liegen. Die nähere Construction dieser idiocyclophanischen Krystalle d. h. natürlichen Polarisationsapparate, welche die Ringsysteme wegen der Dünne der Lamelle in ungewöhnlicher Gröfse und wegen der Schiefe der Austrittsfläche gegen ihre optischen Achsen sehr verzogen zeigen, erhält man auf optischem Wege dadurch, dafs man diese ohne vorläufige Polarisation gesehenen Ringsysteme ihrer Gröfse und Lage nach mit denen vergleicht, welche vorher geradlinig polarisirtes und ebenso nachher analysirtes Licht um die optischen Achsen der einschliefsenden Individuen entwickelt, von denen das eine die polarisirende, das andere die analysirende Vorrichtung abgiebt. Dafs dies letztere der Fall sei, geht aufserdem daraus hervor, dafs, wenn man einen Turmalin vor dem im natürlichen Lichte betrachteten Krystall herumdreht, abwechselnd eins der Ringsysteme ohne Formänderung verschwindet. Da aber die Erscheinung bei Um-

kehrung des Krystalls dieselbe bleibt, so gilt dasselbe für das polarisirende Prisma, womit auch die Intensitätsänderungen der Ringe übereinstimmen, wenn man den Krystall mit bloſsem Auge in geradlinig polarisirtem Lichte betrachtet. Ein entscheidender Beweis dafür, daſs das hintere Individuum geradlinig polarisirend wirkt, liegt, wie mir scheint, aber darin, daſs die mit bloſsem Auge gesehenen Ringe, wenn man circulares Licht einfallen läſst, nicht die Form annehmen, welche diesem entspricht.

Der dritte Fall, daſs die Achse des eingewachsenen Blättchens unter irgend einem Winkel geneigt ist gegen die Achse des einschlieſsenden Krystalls, ist auch für einachsige Krystalle von Bedeutung. Die dadurch hervorgebrachte Modification des Ringsystems um die Achse des einschlieſsenden Krystalls muſs übereinstimmen mit der in zwei genau centrirten Platten, wenn zwischen ihnen ein Krystallblättchen von bestimmter Dicke eingeschaltet ist. Da man hier das Blättchen durch ein gleich wirkendes eines andern Krystalls ersetzen kann, so läſst sich dieser Fall ohne Schwierigkeit nachconstruiren. Unter sieben, eine Abweichung von dem gewöhnlichen Ringsystem zeigenden Kalkspathplatten fand ich zwei, welche eine sehr regelmäſsige Figur gaben, nämlich ein schwarzes Kreuz mit einander abwechselnd berührenden Curven, welche mir Kreise und Lemniscaten zu sein schienen; die innerste Curve war vollkommen zu einer 8 geschlungen. Dreht man die Platte in ihrer Ebene, so besteht der innere Theil des Ringsystems aus vier dreieckigen Räumen. Ganz dieselben Erscheinungen erhielt ich, als ich zwischen zwei genau centrirte, das regelmäſsige Ringsystem gebende Platten ein Glimmerblatt von bestimmter Dicke einschaltete, und dasselbe in seiner Ebene drehte.

## 7. Versuche über Circularpolarisation durch andre Modificationen.

Von krystallinischen Substanzen des regulären Systems habe ich, in Beziehung auf die Wirkung ungleicher Temperaturvertheilung im Innern des Körpers, nur Flufsspath untersucht. Das hierbei angewandte Bruchstück war vollkommen farblos und

durchsichtig, 1½ Zoll lang und von Herrn Prof. Weifs mir zu diesen Versuchen anvertraut. Bei einer Hitze, wo im Glaswürfel der Gangunterschied ¾ Undulation geworden war, zeigte es durchaus keine Wirkung auf geradlinig polarisirtes Licht, obgleich ich, um den Wärmeunterschied zu steigern, das obere Ende desselben durch Schwefeläther fortwährend abkühlte, während das untere auf der heifsen Stahlplatte stand [1]).

Transversal schwingende Klangscheiben wirkten weder auf linear noch auf circular einfallendes Licht. Bekanntlich hat aber Biot durch Longitudinalschwingungen langer Glasstreifen einen Lichtschein zwischen den gekreuzten Spiegeln erhalten. Obgleich mir bei den in dieser Beziehung angestellten Versuchen das Kreuz der Kalkspathfigur sich zu öffnen schien, so bedürfen doch diese Versuche einer Wiederholung mit einem bessern akustischen Apparat.

## 8. Unterschied der Wirkung eines sich erwärmenden und sich abkühlenden Glases.

Zwei quadratische, 3 Linien dicke Scheiben von 11½ und 13¼ Linien Seite gaben bei dem Erhitzen zuerst rechts circulares, dann geradlinig polarisirtes Licht, bei dem Abkühlen aber, nachdem sie durch rechts circulares zum geradlinigen zurückgekehrt waren, noch links circulares. Der Grund dieser Erscheinung ist folgender. Das untere Ende der auf der heifsen Stahlplatte erhitzten Glastafel erkaltet, wenn die Lampe weggenommen ist, schneller als das obere, welchem aufserdem von dem unteren durch Leitung noch Wärme zugeführt wird. Nach einiger Zeit wird daher die Mitte der Platte der wärmste Theil derselben. Diese wärmere Stelle rückt, da das auf dem schnell abgekühlten Wärmeleiter stehende untere Ende immer stärker sich abkühlt, nach Oben, bis endlich die obere Ecke die wärmere wird. Dafs dies wirklich der Grund der Erscheinung sei, sieht man, wenn man die sich abkühlende Scheibe zwischen den gekreuzten Spiegeln betrachtet. Die vier weifsen Räume

[1]) Brewster sagt in Beziehung auf die Farben, welche Flufsspath durch rasches Abkühlen erhält: *Fluor Spar was very slighly affected.*

der Diagonalen erlöschen nämlich nicht an der Stelle, an welcher sie sich bildeten, vielmehr rücken die unteren nach Oben, so dafs das dunkle Kreuz sich in zwei Parallelen verwandelt, welche durch eine lothrechte Linie geschnitten werden. Endlich verdrängen die mittleren weifsen Räume die oberen, während die von Unten neu hinzugetretenen die untere Stelle einnehmen. Bei dem Erwärmen, wo der untere Theil der Platte immer die höchste Wärme behielt, mufste natürlich der Fortgang der Erscheinungen einfacher sein.

Die Wirkung einer bestimmten Stelle eines gekühlten oder gepreſsten Glases als circular polarisirender Apparat in den einzelnen Theilen des Spectrums giebt unmittelbar die Bestimmungselemente für die Farbe, mit welcher es im geradlinig polarisirten Lichte erscheint.

## 9. Erscheinungen gekühlter und gepreſster Gläser im circularen Licht.

Bei circularer Analyse verhalten sich volle gekühlte Cylinder wie Kalkspathplatten. Sie zeigen das Ringsystem ohne Kreuz, bei linearer Analyse in den Quadranten verschoben. Eben so verhalten sich die schroff abgesetzten dem innern schwarzen Ringe concentrischen Farbenringe hohler Cylinder. Das Kreuz in dreiseitigen Platten besteht aus vier schwarzen Punkten (bei zwei auf einander gelegten Platten aus vier Dreiecken), welche, durch hellgraue Schatten verbunden, ein Y bilden. In sechs- und achtseitigen Platten wird der schwarze Centralfleck ein sechs- und achtseitiger Stern, während die Farben der Ecken sich zu einer sehr regelmäfsigen Umschliefsung ordnen, besonders wenn durch Drehung des analysirenden Prismas die Mitte weifs wird. Die isochromatischen Linien rechtwinklig gekreuzter parallelopipedischer Platten bleiben ihrer Form nach denen im linearen Lichte gleich, welche erscheinen, wenn die Polarisationsebene den rechten Winkel zwischen den Platten halbirt. Alle Figuren bleiben unverändert, wenn man die Gläser bei circularer Polarisation und Analyse in ihrer Ebene dreht.

Durch ungleiche Abkühlung entstandene Unregelmäfsigkeiten der Figuren zeigen sich im circularen Licht besonders bei dünnen Platten, oft selbst bei denen, welche im linearen regelmäfsig erschienen, doch habe ich auch gerade das Entgegengesetzte, und zwar bei einer sechsseitigen Platte, beobachtet.

Ein durch umwickelten Messingdraht zusammengepreſster Cylinder [1]) verhielt sich wie ein gekühlter. Quadratische und kreisförmige Platten diametral durch eine Schraube gepreſst, zeigen zwischen den an den Angriffspunkten der Schraube entstehenden Ringen eine farbige Verbindung ohne Kreuz. Liegt die Compressionsachse in der Polarisationsebene des geradlinig polarisirt einfallenden Lichtes, so ist auch hier die Figur in den Quadranten verschoben, wenn das Licht circular analysirt wird.

## 10. Anwendung des Reversionsprismas zur Darstellung elliptischer und circularer Polarisation.

Das Fresnel'sche Parallelopiped bietet in der Anwendung den Uebelstand dar, dafs der linear polarisirt einfallende Strahl zwar parallel mit sich, aber nicht in seiner Verlängerung als circular polarisirter austritt. Dieses Heraustreten aus der Achse des Instruments ist ein wesentlich den Apparat complicirender Umstand. Dieser Uebelstand wird beseitigt, wenn man, wie Airy es gethan hat, ein Krystallblättchen so spaltet, dafs bei Drehung in seiner Ebene der Gangunterschied beider auf einander senkrecht polarisirter Strahlen die Gröſse erhält, welche das lineare Licht in die verschiedenen Arten des elliptischen und circularen verwandelt. Denselben Zweck erhält man durch den Babinet'schen Compensator, der aus zwei gegen einander verschieblichen Bergkrystallkeilen besteht, welche zusammengelegt ein rechtwinkliges Parallelopipedon darstellen, dessen einander gegenüberstehende parallele Flächen eine Platte von veränderlicher

[1]) Diese Anwendung der Weber'schen Pressungsmethode des Glases auf Polarisationserscheinungen hat mir Herr Prof. Mitscherlich gezeigt. (Vergl. Pogg. Annal. Bd. XX S. 1.)

Dicke darstellen. In dem einen der Keile ist die Achse parallel der Schneide des Keils, in dem andern liegt sie hingegen senkrecht auf diese Schneide in einer der Flächen, welche bei dem Zusammenlegen beider Keile eine der Oberfläche der parallelopipedischen Platte bilden. Man erhält hierdurch dasselbe Resultat, welches wir oben durch Vorbeiführen eines gepreſsten oder schwach gekühlten Glases erhielten.

Auf folgende Weise kann man bei Anwendung des Fresnelschen Princips den Strahl in seiner eignen Verlängerung austretend erhalten. Schleift man ein gleichschenkliges Prisma so, daſs der parallel der Grundfläche auf die Seitenfläche einfallende Strahl nach seiner Brechung auf die Grundfläche unter dem Winkel der totalen Reflexion auffällt, so wird der Gangunterschied zwischen den in der und senkrecht auf die Reflexionsebene polarisirten Lichtmengen hervorgebracht werden, welcher einer einmaligen totalen Reflexion entspricht. Fällt die Brechungsebene eines zweiten dem ersten gleichen Prisma mit der des ersten zusammen, so wird sich der Gangunterschied beider addiren. Stehen hingegen die Brechungsebenen beider Prismen senkrecht auf einander, so wird der im ersten entstandene Gangunterschied im zweiten aufgehoben. Schaltet man daher ein so construirtes Reversionsprisma, in der Stellung der Prismen, wo es die Gegenstände vollständig umkehrt, in einen linear polarisirenden Apparat ein, so wird dasselbe auf die Polarisation des Strahles keinen Einfluſs äuſsern. Dreht man hingegen das eine Prisma so in seiner Fassung gegen das andre, daſs die vorher auf einander senkrechten Brechungsebenen zuletzt zusammenfallen, so wird ein im Azimuth 45° einfallender linearer Strahl allmählig immer elliptischer werden und sich der Circularpolarisation immer mehr nähern, welche bei dem Zusammenfallen nahe erreicht wird.

Fig. 15 stellt einen kleinen, aus einem einzigen Glasstück bestehenden Apparat vor, welcher die Modificationen des Lichtes durch Reflexionen vereinigt zeigt. Die einander parallelen Flächen *ad* und *bc* stehen lothrecht auf den parallelen Flächen *ac* und *bd*, hingegen ist *ab* gegen *ad* und *cd* gegen *bd* unter 45° geneigt. Senkrecht auf *ad* fallendes Licht wird daher, nachdem

es von $ab$ und $cd$ reflectirt worden, aus $bd$ austreten. Die den Raum totaler und theilweiser Reflexion begrenzenden prismatischen Bogen schneiden einander daher wie in der daneben stehenden Zeichnung. Im Raume $m$ ist das Licht nach zweimaliger totaler Reflexion unpolarisirt, in den Räumen $o$ und $n$ senkrecht auf einander polarisirt, im Raume $p$ hingegen theilweise polarisirt einfallendes Licht im Sinne der zweiten Reflexion geändert. Das Licht des Raumes $m$ unterscheidet sich von dem aus einem Fresnel'schen Parallelopiped dadurch, dafs die Ebenen der zweimaligen Reflexion lothrecht auf einander stehn, statt dafs sie dort zusammenfallen.

## 11. Unterscheidung positiver und negativer Krystalle im circularen und elliptischen Licht [1]).

### *a*) Einachsige Krystalle.

Betrachtet man eine auf die Achse senkrecht geschnittene Platte eines negativen Krystalls in linear polarisirtem Lichte, welches man linear analysirt, so sieht man genau dieselben Erscheinungen, als die, welche eine ebenso geschnittene Platte eines positiven Krystalls unter denselben Bedingungen zeigt. Erst wenn man zwei verschiedenen, einachsigen Krystallen angehörige Platten auf einander legt, kann man aus dem Verengern der Ringe schliefsen, dafs beide gleichartig sind, d. h. beide positiv oder beide negativ, aus dem Erweitern derselben hingegen, dafs sie ungleichartig sind, d. h. der eine positiv, der andre negativ. Wegen der Schwierigkeit des genauen Centrirens solcher Platten hat das folgende Unterscheidungsmittel Vorzüge, indem die blofse Ansicht der Platte in einem circular polarisirenden Apparate unmittelbar darüber entscheidet, ob der Krystall ein positiver oder negativer ist. Dieses Unterscheidungsmittel kann auf folgende Weise ausgesprochen werden:

> rechts circular einfallendes Licht bewirkt um die Achse eines negativen Krystalls, in darauf senkrecht geschnittenen Platten linear analysirt, dieselben Erscheinungen als links circular einfallendes Licht, eben so analysirt um die Achse

[1]) Pogg. Ann. 40, p. 457.

eines positiven Krystalls, und umgekehrt: links circular einfallendes Licht in jenen dieselben Phänomene, als rechts circular einfallendes in diesen. Derselbe Unterschied zeigt sich, wenn linear einfallendes Licht circular analysirt wird.

Bezeichnet $I$ die Intensität des von dem Zerlegungsspiegel reflectirten Lichtes, welches irgendwie polarisirt in irgend einer Richtung vorher durch eine Krystallplatte gegangen, auf die es unter dem Winkel $\vartheta$ fiel, so wird, wenn der Einfallswinkel $\vartheta$ klein ist, und man dann nach Airy [1])

$$\Theta = I\left(\frac{a^2 - b^2}{26}\right)\vartheta^2,$$

setzt, wo $\frac{1}{a}$ das Brechungsverhältnifs des ungewöhnlichen Strahls, $\frac{1}{b}$ das des gewöhnlichen in der auf die Achse lothrechten Ebene, und $I$ die Dicke der Platte, wenn $c^2$ die Intensität der einfallenden Strahlen bezeichnet

$$I = \frac{c^2}{2}\Big\{1 + \cos 2\beta \cos 2\varphi \cos 2(\beta + \alpha + \varphi) + \cos\frac{2\pi}{\lambda}\Theta \cos 2\beta \sin 2\varphi \sin 2(\beta + \alpha + \varphi) - \sin\frac{2\pi}{\lambda}\Theta \sin 2\beta \sin 2\varphi\Big\}$$

in welcher Formel $\alpha$ der Winkel der Reflexionsebene des Zerlegungsspiegels mit der Reflexionsebene des Polarisationsspiegels ist, $\beta$ das Azimuth des zwischen diesem und der Krystallplatte eingeschalteten Fresnel'schen Parallelopipeds von der ursprünglichen Polarisationsebene an gezählt, $\varphi$ der Winkel, welchen der durch die Richtung des einfallenden Strahls gelegte Hauptschnitt des Krystalls mit der Polarisationsebene macht, und $\lambda$ die Wellenlänge des Lichts in der Luft für eine bestimmte Farbe.

Da für negative Krystalle $a$ gröfser als $b$ ist, so wird für diese $\Theta$ positiv, dasselbe hingegen negativ für positive Krystalle, in welchen $a$ kleiner als $b$ ist.

Für $\beta = o$ ist das einfallende Licht linear polarisirt. In diesem Falle wird

[1]) Pogg. Ann. 23, p. 228.

$$I = \frac{c^2}{2}\left\{1 + \cos 2\varphi \cos 2(\alpha+\varphi) + \cos\frac{2\pi}{\lambda}\Theta \sin 2\varphi \sin 2(\alpha+\varphi)\right\}$$

welche Formel dieselbe bleibt, wenn das Zeichen von $\Theta$ sich ändert, woraus hervorgeht, dafs bei linearer Polarisation und linearer Analyse positive und negative Krystalle sich gleich verhalten.

Setzt man hingegen $\beta = 45°$, so wird

$$I = \frac{c^2}{2}\left\{1 - \sin\frac{2\pi}{\lambda}\Theta \sin 2\varphi\right\}$$

hingegen für $\beta = 135°$

$$I = \frac{c^2}{2}\left\{1 + \sin\frac{2\pi}{\lambda}\Theta \sin 2\varphi\right\}$$

Formeln, welche sich mit einander vertauschen, wenn man $-\Theta$ statt $+\Theta$ schreibt, woraus unmittelbar folgt, dafs in positiven Krystallen rechts circulares Licht eben so wirkt, als links circulares in negativen und umgekehrt.

Daraus folgt also:

Geht die Reflexionsebene des Fresnel'schen Parallelopipeds durch die Theilungspunkte 45° und 225°, so sind in negativen Krystallen die Farbencurven im zweiten und vierten Quadranten (rechts oben und links unten) vom Mittelpunkt entfernt, im ersten und dritten ihm genähert. Die schwarzen Flecke der halbhellen Trennungsbüschel liegen im zweiten und vierten Quadranten. In positiven Krystallen hingegen sind die Farbencurven im zweiten und vierten Quadranten dem Mittelpunkt genähert, im ersten und dritten von ihm entfernt, die schwarzen Flecke liegen im zweiten und vierten Quadranten. Geht die Reflexionsebene des Fresnel'schen Rhomboëders durch die Theilungspunkte 135° und 315°, so treten die zuletzt beschriebenen Phänomene in negativen Krystallen ein, die zuerst beschriebenen in positiven. Alle Erscheinungen kehren sich genau um, wenn lineares Licht circular analysirt wird.

Ist der Werth von $\beta$ kein ganzes Vielfaches von $\frac{1}{8}\pi$, d. h. ist das einfallende Licht elliptisch polarisirt, so tritt ebenfalls ein Unterschied zwischen positiven und negativen Krystallen ein, welcher, da die Erscheinungen im ersten Quadranten mit

denen im dritten, die im zweiten mit denen im vierten übereinstimmen, sich unmittelbar übersehen läfst. Alle diese Folgen der allgemeinen Gleichung stimmen vollkommen mit der Erfahrung überein.

Im fünften Abschnitt pag. 285 wurden die Farbenerscheinungen combinirter Krystalle daraus abgeleitet, dafs das hinter der auf die Achse senkrecht geschnittenen Krystallplatte eingeschaltete dicke Glimmerblatt für eine bestimmte Farbe das Licht circular, für eine andre elliptisch oder linear polarisirt. Es ist nun klar, dafs auch für diese Phänomene für positive und negative Krystalle eine analoge Vertauschung, wie die bisher erörterte, stattfindet. Darauf kommt nun der Unterschied hinaus, welchen Brewster als empirisches Unterscheidungsmittel negativer und positiver Krystalle empfiehlt. Er nimmt ein Gypsblättchen, welches z. B. das Roth der zweiten Ordnung giebt, und untersucht, in welchem Quadranten dasselbe Roth durch das Gypsblättchen verlöscht wird. Dieses Verfahren bietet bei stark gefärbten Mineralien eine Schwierigkeit dar, von welcher das obige frei ist.

Läfst man im Azimuth $+45°$ oder $-45°$ polarisirtes Licht von einer Metallfläche unter ihrem Polarisationsmaximum reflectiren, und dann durch die Krystallplatte hindurchgehen, so entfernen sich die Farbencurven in einem positiven Krystall vom Mittelpunkt, in welchem sie sich in einem negativen ihm nähern.

In allen diesen Erscheinungen verhält sich das Ringsystem gekühlter Glascylinder wie die Platte eines positiven Krystalls. Dasselbe gilt von den Stellen des Amethyst, in welchen die die Polarisationsebene des einfallenden Lichts rechts drehenden Theile in die links drehenden übergehen, überhaupt in allen Bergkrystallen, welche an bestimmten Stellen die Richtung der Polarisationsebene unverändert lassen.

### *b*) Zweiachsige Krystalle.

Betrachtet man zwischen den gekreuzten Spiegeln eine auf die Halbirungslinie des spitzen Winkels der optischen Achsen eines zweiachsigen Krystalls senkrecht geschnittene Platte, so

sieht man, wenn die optischen Achsen in einer der Reflexionsebenen liegen, die beiden sie einzeln umschliefsenden Ringsysteme durch die Arme eines schwarzen Kreuzes verbunden, welche sich noch weit über sie hinaus erstrecken. Die beiden andern auf dem erstern senkrechten Arme treffen die Ringsysteme nicht. Durch dieses schwarze Kreuz wird also das Ganze in vier gleiche Quadranten getheilt. Von den Erscheinungen im circularen Licht, welches man linear analysirt, wird man sich leicht eine Vorstellung bilden, wenn man sich die Ringe im ersten und dritten Quadranten um ein halbes Intervall vom Mittelpunkte des Kreuzes entfernt denkt, die im zweiten und vierten um eben so viel ihm genähert, oder jene genähert und diese entfernt, je nachdem nämlich das einfallende Licht rechts oder links circular ist. Dies Verschieben sieht man am deutlichsten, wenn man das vorher linear auffallende Licht durch die verschiedenen Grade des elliptischen allmählig in circulares übergehen läfst. Das geschlossene Centralkreuz öffnet sich in immer mehr sich aufhellende hyperbolische Aeste, welche im circularen Licht zuletzt nur in den schwarzen Scheitelflecken zu erkennen sind, die aber hier nicht durch Grau in Weifs übergehen, sondern nach der einen Seite gelb, nach der andern blau gefärbt sind, wie ein durch ein Prisma betrachteter schwarzer Fleck auf weifsem Grund.

Analysirt man linear einfallendes Licht circular, so kehrt sich die Erscheinung um, d. h. die Scheitel der hyperbolischen Büschel liegen nun im zweiten und vierten Quadranten, wenn sie vorher im ersten und dritten lagen.

So wie nun die positiven und negativen einachsigen Krystalle in circular polarisirtem Licht sich dadurch von einander unterscheiden, dafs, wenn in einem Krystalle der ersten Klasse die Ringe im zweiten und vierten Quadranten sich dem Mittelpunkte nähern, sie in einem der andern Klasse, bei eben so auffallendem Lichte, sich von ihm entfernen, so zerfallen in Beziehung auf das Auseinanderbrechen der beiden Ringsysteme in Hälften und das Oeffnen des centralen Kreuzes in hyperbolische Aeste, wenn das vorher linear einfallende Licht durch elliptisches in circulares übergeht, die zweiachsigen Krystalle auf gleiche

Weise in zwei entsprechende Klassen, welche sich also dadurch unterscheiden, dafs in denselben Quadranten für die eine Klasse Annäherung der Farbencurven stattfindet, in welcher bei der andern ein Entfernen beobachtet wird, welche beide Klassen durch die Krystalle in einander übergehen, in welchen die optischen Achsen auf einander senkrecht stehen. Bezeichnen wir nun die vier Quadranten wie bei den einachsigen Krystallen, so verhalten sich z. B. Glimmer, Talk, Arragonit, Salpeter und Feldspath wie die negativ einachsigen Kalkspath, Beryll, Turmalin und Idocras, hingegen Topas und Gyps wie der positive Zircon.

Analysirt man circular einfallendes Licht circular, so erhält man die Lemniscaten ohne Kreuz. Die Mittelpunkte der Ringe erscheinen aber nicht als schwarze Punkte, sondern als farbig verlaufende Flecke.

Die Farbenfolge dieser Centralflecke bestimmt sehr einfach, ob die rothen oder blauen Achsen des Krystalls den kleinsten Winkel mit einander machen. Das erstere ist bei dem Arragonit und Salpeter, das letztere bei dem Topas und Glimmer der Fall. Bei jenen wenden daher die Centralflecke ihre blauen Enden einander zu, bei diesen die gelben.

## 12. Zusammenhang der optischen Eigenschaften der Bergkrystalle mit ihren äufsern krystallographischen Kennzeichen [1]).

Die Entdeckung von Biot, dafs die Bergkrystalle in zwei optisch verschiedene Klassen zerfallen, von denen die der einen angehörigen Individuen die Polarisationsebene des ihre Achse durchlaufenden Lichtes nach Rechts drehen, die der andern nach links, ist von Herschel und Brewster vervollständigt worden, indem der erstere nachwies, dafs der Sinn, in welchem die Trapezflächen an den plagiedrischen Bergkrystallen um diese herumliegen, den Sinn jener Drehung bestimme; der letztere aber zeigte, dafs im Amethyst rechts und links drehende Berg-

[1]) Pogg. Ann. 40, pag. 607.

krystall-Individuen mit einander vereinigt sind. Die nachfolgenden Untersuchungen zeigen, dafs es aufser der Verbindung der beiden optischen Klassen des Bergkrystalls im Amethyst noch andere Verbindungen beider giebt, welche insofern von Interesse sind, weil sie beweisen, dafs nicht nur die Neigung und Aufeinanderfolge der Flächen, sondern auch die physische Beschaffenheit derselben im innigsten Zusammenhange mit den Cohäsionsverhältnissen steht, welche die Wirkung des Bergkrystalls auf das Licht bedingen.

Da die krystallographischen Kennzeichen rechts und links drehender Krystalle in den optischen Lehrbüchern sehr undeutlich beschrieben sind, da sogar in einigen die Krystalle rechtsgewunden heifsen, welche in anderen linksgewunden genannt werden, so werde ich zunächst die optischen Eigenschaften der plagiedrischen Krystalle beschreiben.

### Plagiedrische Krystalle (Fig. 17, 18).

Die plagiedrischen Krystalle unterscheiden sich dadurch, dafs in manchen Individuen die Kantenzone [1]) *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, in welcher die Trapezflächen *b*, *d* liegen, von Links oben nach Rechts unten geht (Fig. 17), in anderen Individuen von Rechts oben nach Links unten (Fig. 18). In Individuen der ersten Art (Fig. 17.) dreht sich die Polarisationsebene des einfallenden Lichtes, je mehr sich der linear polarisirt einfallende Strahl dem Auge nähert, immer mehr nach Links, d. h. die Durchschnittslinie der ursprünglichen Polarisationsebene mit der Kreistheilung der analysirenden Vorrichtung bewegt sich auf dieser entgegengesetzt der Bewegung des Zeigers einer Uhr, wenn der Strahl immer dickere Scheiben des Krystalls nach dem Auge hin durchläuft. In Individuen der zweiten Art (Fig. 18) dreht sich hingegen die Polarisationsebene des einfallenden Lichtes, je mehr sich der Strahl dem Auge nähert, desto mehr nach Rechts, d. h. der Durchschnitt der ursprünglichen Polarisationsebene mit der Kreistheilung der analysirenden Vorrichtung bewegt sich bei stets sich vergröfsernder Annäherung auf jener wie der Zeiger einer

[1]) Bekanntlich werden die in Parallelen einander schneidenden Krystallflächen als in einer Zone liegend betrachtet.

Uhr. Nennt man nun mit Biot jene Krystalle (Fig. 17) links drehende, diese (Fig. 18) rechts drehende, so sieht man leicht, dafs die durch die Richtung des Pfeils angegebene Drehung der Polarisationsebene stets in einem Sinne geschieht, welcher entgegengesetzt dem ist, in welchem die Kantenzone der Trapezflächen um den Krystall herumliegt.

Die weiteren optischen Unterscheidungsmittel der zwischen gekreuzten Turmalinen oder Spiegeln beobachteten, auf die Achse senkrecht geschnittenen Krystallplatten sind nun folgende:

1. Für links drehende Bergkrystalle.

*a*) Bei dem Linksdrehen [1]) der analysirenden Vorrichtung erweitern sich die Ringe, bei dem Rechtsdrehen verengen sie sich.

*b*) Bei dem Linksdrehen der analysirenden Vorrichtung geht in dünnen Platten die Mitte des bläulichen kurzarmigen Kreuzes durch Violett in Gelb über.

*c*) Die analysirende Vorrichtung mufs links gedreht werden, um bei aufeinandergelegten Platten dieselbe Centralfarbe oder in einfachem Licht das kurzarmige schwarze Kreuz zu erhalten, welche man vorher bei einer Platte erhielt.

*d*) Analysirt man circular in den Bergkrystall einfallendes Licht nach seinem Austritt aus der Platte linear, so sieht man die zwei in einander gewickelten, (Fig. 17 *a*) dargestellten, rechts gewundenen Spiralen, deren Anfangspunkte aber bei entgegengesetzt circular einfallendem Lichte [2]) in einer senkrechten, statt in einer lothrechten Linie liegen.

*e*) Analysirt man linear in den Bergkrystall einfallendes Licht nach seinem Austritt aus der Platte circular, so sieht man die zwei in einander gewickelten, (Fig. 18 *b*) dargestellten, links gewundenen Spiralen, deren Anfangspunkt

[1]) Unter Linksdrehen verstehe ich, wie gebräuchlich, die Art, wie man einen Schraubenzieher dreht, um eine Schraube herauszuziehen, unter Rechtsdrehen die Bewegung des Schraubenziehers bei dem Befestigen der Schraube.

[2]) Wenn das Rhomboëder im Azimuth $-45°$ statt $+45°$ liegt.

aber bei entgegengesetzt circular einfallendem Lichte in einer senkrechten, statt in einer lothrechten Linie liegen.

*f*) Analysirt man circular einfallendes Licht circular und zwar so, dafs die unter *d* und *e* beschriebenen Anfangspunkte der Spiralen in einer lothrechten Linie liegen, und eine Kalkspathplatte das Ringsystem mit schwarzem Centralfleck ohne Kreuz zeigt, so erhält man ein Ringsystem mit zwei schwarzen, innerhalb des innersten Ringes liegenden Centralflecken, welche in einem lothrechten Durchmesser liegen (Fig. 23).

*g*) Sind die Anfangspunkte der Spiralen hingegen horizontal, wie in Fig. 17 *a* und Fig. 18 *b*, wenn circulares Licht linear, oder lineares circular analysirt wird, so sieht man die schwarzen Centralflecke in einem horizontalen Durchmesser (Fig. 23 *b*), wenn das circular einfallende Licht auch circular analysirt wird.

2. Für rechts drehende Bergkrystalle.

*a*) Bei dem Linksdrehen der analysirenden Vorrichtung verengen sich die Ringe, bei dem Rechtsdrehen erweitern sie sich.

*b*) Bei dem Rechtsdrehen der analysirenden Vorrichtung geht in dünnen Platten die Mitte des bläulichen kurzarmigen Kreuzes durch Violett in Gelb über.

*c*) Die analysirende Vorrichtung mufs rechts gedreht werden, um bei aufeinandergelegten Platten dieselbe Centralfarbe oder in einfachem Licht das kurzarmige schwarze Kreuz zu sehen, welche man vorher bei einer Platte erhielt.

*d*) Analysirt man circular in den Bergkrystall einfallendes Licht nach seinem Austritt aus der Platte linear, so sieht man die zwei (Fig. 18 *b*) dargestellten, in einander gewickelten, links gewundenen Spiralen, und zwar deren Anfangspunkte in einem horizontalen Durchmesser, wenn der Anfangspunkt der rechts gewundenen Spiralen einer links drehenden Platte bei eben so einfallendem Lichte in einem lothrechten Durchmesser liegt, hingegen jene in einem lothrechten, wenn diese in einem horizontalen sich zeigen.

*e*) Analysirt man linear in den Krystall einfallendes Licht nach seinem Austritt aus der Platte circular, so sieht man die (Fig. 17 *a*) dargestellten, rechts gewundenen Spiralen, und zwar ihre Anfangspunkte in einem lothrechten Durchmesser, wenn eine eben so betrachtete Platte eines links drehenden Krystalls die Anfangspunkte ihrer Spiralen horizontal giebt.

*f*) Analysirt man circular einfallendes Licht circular, so dafs die unter *d* und *e* beschriebenen Anfangspunkte lothrecht liegen, so erhält man das Ringsystem 23, hingegen 23 *b*, wenn jene horizontal liegen. Daraus folgt also:

*g*) Bei circularer Polarisation und circularer Analyse liegen in einer rechts drehenden Platte die Centralflecke stets in einem Durchmesser, welcher senkrecht steht auf der Verbindungslinie der schwarzen Flecke einer links drehenden Platte.

### 3. Combinirte Platten verschiedener Individuen.

Betrachtet man, wie Airy zuerst gezeigt hat, zwischen den gekreuzten Turmalinen zwei gleich dicke Platten, die so aufeinandergelegt sind, dafs die dem rechts drehenden Krystall angehörige Platte der analysirenden Vorrichtung zugekehrt ist, die dem links drehenden Individuum angehörige der polarisirenden Vorrichtung, so sieht man die (Fig. 20) dargestellten Spiralen, hingegen die (Fig. 21) dargestellten, wenn die links drehende Platte die dem Auge zunächstliegende ist.

Wir wenden uns nun zu den Erscheinungen der in der Natur vorkommenden Combinationen.

### 4. Der Amethyst.

Brewster hat in seiner, an interessanten Beobachtungen reichen Abhandlung über den Amethyst bereits angeführt, dafs da, wo die die Polarisationsebene rechts drehenden Theile in links drehende übergehen, ein Ringsystem mit schwarzem Kreuz sich zeigt, wie im Kalkspath, wenn die Platte zwischen gekreuzte Turmaline gebracht wird. Doch vermuthet er, weil bei dem Drehen der Platte in ihrer Ebene sich das Kreuz in

zwei dunkle Hyperbeln öffnet, dafs hier der Krystall wie ein optisch zweiachsiger wirke, dessen Achsen einen kleinen Winkel mit einander machen.

Diese krystallographisch wenig wahrscheinliche Ansicht hat auch wohl optisch viel von ihrem Gewichte verloren, seitdem man durch Combination auf die Achse senkrecht geschnittener Platten mit dünnen Krystalllamellen, d. h. wenn auf diese Weise das auf jene Platten einfallende lineare Licht in circulares oder elliptisches verwandelt wird, ganz analoge Fälle kennen gelernt hat. Unter den von mir untersuchten Amethysten befand sich einer, der die charakteristischen Phänomene der Streifung und Abwechselung der Farbendreiecke in gröfster Vollendung zeigte, und keinen Zweifel darüber liefs:

dafs an den Stellen, wo die rechts drehenden Theile in die links drehenden übergehen, der Bergkrystall sich genau wie ein einachsiger, und zwar wie ein positiver Krystall verhält.

Bei dem Vorüberführen der Platte sieht man nämlich folgende Erscheinungen:

*a*) Bei linearer Polarisation und Analyse:
Das gewöhnliche Ringsystem des Bergkrystalls mit farbiger Mitte und hellgrauem bei dem ersten Ringe anfangenden Kreuz, welches sich durch Rechtsdrehen der analysirenden Vorrichtung verengert, verwandelt sich in ein Ringsystem mit schwarzem Kreuz, dessen Arme in der Mitte zusammenstofsen (Fig. 13), ehe es in ein zweites Ringsystem mit farbiger Mitte und hellgrauem Kreuz übergeht, dessen Ringe bei dem Rechtsdrehen der analysirenden Vorrichtung sich erweitern.

*b*) Bei circularer Polarisation und linearer Analyse:
Die rechts gewundenen Spiralen (Fig. 17 *a*) gehen, ehe sie sich in die links gewundenen Spiralen (Fig. 18 *b*) verwandeln, durch die Figur einachsiger Krystalle mit den in 4 Quadranten auseinander gebrochenen Ringen hindurch. Die Ringe sind in den Quadranten, wo sie bei dem Beryll, Kalkspath, Turmalin und einachsigen Glimmer dem Mittelpunkt sich nähern, von diesem erfernt,

genau wie im Zircon, der Krystall also an dieser Stelle positiv [1]).

*c*) Bei linearer Polarisation und circularer Analyse:
Die Erscheinungen sind die umgekehrten der vorigen, die Anfangspunkte der entgegengesetzt laufenden Spiralen um 90° verschieden, und an den Uebergangsstellen die vorher vom Mittelpunkt entfernten Quadranten diesem genähert.

*d*) Bei circularer Polarisation und Analyse:
Die Erscheinung tritt hier am auffallendsten hervor. Nach dem oben unter *g* angeführten Unterscheidungsmittel liegen nämlich, wenn ein gewöhnlicher einachsiger Krystall das Ringsystem mit schwarzem Centralfleck zeigt, die beiden Flecke in einer rechts drehenden Platte in einem Durchmesser, welcher senkrecht auf der Verbindungslinie der schwarzen Flecke einer links drehenden Platte steht. Geht nun das links gewundene Individuum allmählig so in das rechts gewundene über, dafs an einer bestimmten Stelle beide einander genau das Gleichgewicht halten, und verhält sich der Krystall an dieser Stelle wie ein gewöhnlicher einachsiger Krystall, so werden die schwarzen Flecke bei dem Vorüberführen der Platte sich einander allmählig nähern, dann zusammenfallen und nachher in einem auf dem ersten senkrechten Durchmesser wieder auseinandergehen. Diese in Fig. 23, 23 *a*, 23 *b* dargestellte Erscheinung sieht man nun auch in voller Deutlichkeit.

5. Bergkrystalle, an denen rechte und linke Trapezflächen zusammen vorkommen (Fig. 19).

Wegen der Seltenheit dieser Krystalle habe ich nur zwei untersuchen können, welche der Berliner Königlichen Mineraliensammlung gehören, und von welchen Herr Professor Weifs eine Platte abzuschneiden erlaubte. Der gröfsere derselben, dessen Säulenflächen 10 Linien von einander abstanden, erschien zwischen den Pyramidalflächen zwar wasserhell, gab aber nur eine im Innern sehr zerklüftet und wolkig erscheinende, $3\frac{1}{2}$ Linie dicke

[1]) Gilbert's Annalen, Bd. XXXX, S. 459.

Platte, der andere hingegen war in seiner, einen Zoll langen aber schmaleren Säule vollkommen wasserhell. Die rechten und linken Trapezflächen kamen bei dem ersteren an mehreren Säulenflächen vor, bei den letzteren nur an einer.

Der trübe zeigte aufser der gewöhnlichen Bergkrystallfigur eines links drehenden Individuums, welche an den scheinbar homogensten Stellen und vorwaltend erschien, an mehreren Stellen sehr deutlich die (Fig. 20) dargestellten Spiralen, welche sich an einigen Stellen, ohne Umkehren der Platte, in die (Fig. 21) dargestellten verwandelten, wenn die den Pyramidalflächen zunächstliegende Fläche der Platte dem Polarisationsspiegel zugekehrt wurde. War sie hingegen der analysirenden Vorrichtung zugewendet, so erschien Fig. 21 an vielen Stellen sehr deutlich, hingegen Fig. 20 nur an einigen, und zwar nur als Uebergang in die Figur eines gewöhnlichen einachsigen Krystalls, wie man sie so häufig in den weniger regelmäfsigen Amethysten, besonders den stark blauen sieht.

Der durchsichtige Krystall gab, aufser dem Ringsystem eines rechts drehenden Bergkrystalls, an zwei schmalen Stellen am Rande das Ringsystem der einachsigen Krystalle, und zwar bei circularer Polarisation das eines positiven. An diesem Krystall war die rechte Trapezfläche viel gröfser als die linke, bei dem vorigen hingegen alle linken Trapezflächen gröfser als die rechten. Nach den optischen Eigenschaften mufs man schliefsen, dafs dort in einen ursprünglich links drehenden Krystall an einzelnen Stellen rechts drehende Theile eingeschaltet sind, hier hingegen in einen ursprünglich rechts drehenden links drehende eingedrungen sind. Dies hängt vielleicht mit der gröfseren oder geringeren Ausbildung der einen Art der Trapezflächen zusammen, welche in sofern ein Kennzeichen für die zu erwartenden optischen Eigenschaften des Krystalls abgeben würde. Auffallend wenigstens ist, dafs dort an keiner Stelle neben der Figur eines links drehenden Individuums und den Uebergangsformen in der Combination beider Arten auch die Figur eines rechts drehenden Individuums sichtbar wird, hier neben der Figur eines rechts drehenden Individuums und der Uebergangsformen eben so wenig die eines rechts drehenden erscheint.

6. Bergkrystalle mit abwechselnd matten und glatten Stellen auf den Pyramidal- und Säulenflächen.

Unter den Dauphineer Bergkrystallen findet man Individuen, bei welchen matte und spiegelnde Stellen auf den Pyramidalflächen, und öfters auch auf den Säulenflächen so mit einander abwechseln, dafs gewöhnlich eine ganz matte Fläche neben zwei spiegelnden liegt, dann wieder eine matte folgt u. s. f., häufig aber auch matte Stellen in die spiegelnden Flächen und umgekehrt spiegelnde in die matten übergreifen, so dafs auf einer Fläche eine oder zwei Abwechselungen vorkommen, die durch gerade oder krumme Linien begrenzt sind. Eine von einem solchen Krystall abgeschnittene Platte gab, aufser dem Ringsystem eines rechts drehenden Individuums, die Fig. 20 gezeichneten Spiralen, welche bei dem Umkehren der Platte sich in Fig. 21 verwandelten, sehr deutlich, und das Ringsystem der gewöhnlichen einachsigen Krystalle mit schwarzem Kreuz.

Eine bereits geschliffene Platte mit matten und spiegelnden Abwechselungen auf den Säulenflächen zeigte, aufser dem Ringsystem eines links drehenden Bergkrystalls, das einachsige System positiver Krystalle, ohne alle Verzerrung, mit vollkommen geschlossenem schwarzen Kreuz.

7. Untersuchung bereits geschliffener Platten, ohne krystallographische Kennzeichen.

Man könnte vermuthen, dafs Scheiben, welche wolkige Stellen enthalten, vorzugsweise zu den bisher betrachteten Klassen gehören werden. Dies ist aber nicht immer der Fall. Es giebt vollkommen durchsichtige Platten, welche an gewissen Stellen sich wie positiv einachsige verhalten; hingegen Scheiben, welche mit Wolken und Sprüngen scheinbar durchzogen, doch in allen Theilen auf dieselbe Weise die Polarisationsebene des einfallenden Lichtes drehen. Auch scheint die Gröfse der Krystalle darauf keinen Einflufs zu üben. Eine 10 Linien dicke Platte, deren gröfste Breite 3 Zoll, die kleinste 2 Zoll betrug, drehte in allen Theilen, obgleich mit vielen wolkigen Stellen, die Polarisationsebene noch links. Eine 14 Linien dicke, sehr

durchsichtige Scheibe Rauchtopas verhielt sich eben so, obgleich sie einige, wenn auch kleine Trübungen zeigte. Hingegen finden sich ganz gleichartig durchsichtige, kleine Scheiben optisch ungleichartig.

Es giebt ein sehr einfaches Mittel, solche Krystalle zu erkennen. Man beobachtet sie im polarisirten Licht aus der Weite des deutlichen Sehens, wie ein gekühltes Glas. Erscheint die Scheibe gleichmäfsig bei senkrechter Incidenz gefärbt, so ist sie optisch homogen. Erblickt man hingegen zwischen den gekreuzten Spiegeln an einer Stelle der Scheibe den farbigen Raum durch einen dunkeln Raum mit hellen Streifen oder weifsen Raum mit dunkeln Streifen begrenzt, oder erscheint zwischen den Spiegeln mit zusammenfallenden Reflexionsebenen diese Stelle wie ein in gewöhnlichem Lichte betrachtetes Stück Quarz, so zeigt der Krystall an dieser Stelle im polarisirenden Mikroskope eine Abweichung vom gewöhnlichen Ringsystem. Es ist dabei merkwürdig, dafs wenigstens bei 11 von mir untersuchten Platten, bei welchen die Gestalt und Gröfse dieser Stelle sehr verschieden sich zeigte, diese doch nie von dem farbigen Raume umschlossen wurde, sondern immer an den Grenzen der sechsseitigen Scheiben, und oft sehr regelmäfsig vertheilt, in diese wie von Aufsen eindringend, erschien. Denkt man sich in das begrenzende Sechseck ein ihm ähnliches mit parallelen Seiten beschrieben, so erwies sich bei einer Scheibe der Zwischenraum zwischen zwei Paaren der Seiten als die zusammengesetzte Stelle des Krystalls scharf gegen den farbigen Raum sich abgrenzend. Häufiger aber ist diese Grenze unregelmäfsig, sehr oft mit vielen aus- und einspringenden Winkeln festungsartig gezeichnet. Da dieser häufig sehr kleine Raum immer an der Grenze der Platte sich findet, so wird der Krystall oft so gefafst, dafs sie ganz abgeblendet wird, und man findet einen bisher für gleichartig gehaltenen Krystall nach dem Entfernen der Blendung zusammengesetzt.

Von fünf im Allgemeinen rechts drehenden Krystallen gaben drei noch das Ringsystem einachsiger positiver Krystalle, einer die combinirten Spiralen Fig. 20, und einer diese Spiralen und das positive Ringsystem. Eben so zeigte eine sonst links

drehende vollkommen durchsichtige Platte die combinirten Spiralen und das positive einachsige System.

Bei allen Scheiben sind bei dem Umwenden der Platte die Spiralen im entgegengesetzten Sinne gewickelt, d. h. Fig. 20 verwandelt sich in Fig. 21.

Sehr merkwürdig verhielt sich eine 4 Linien dicke Platte, deren parallele Seiten etwa 8 Linien von einander entfernt waren. Zwischen den gekreuzten Spiegeln betrachtet, erschien, wenn die sechs aufeinanderfolgenden Seiten der Platte mit *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f* bezeichnet werden, an drei aneinandergrenzenden Seiten, *a*, *b*, *c*, die zusammengesetzte Stelle, welche an der mittelsten Seite *b* breit in den farbigen Raum eingreift, an den beiden andern *a*, *c* aber durch sehr feine parallele Streifen begrenzt wurde. Der farbige Raum selbst, welcher noch etwas mehr als $^3/_4$ der Scheibe einnahm, erschien durch breite, den drei übrigen Seitenlinien, *d*, *e*, *f* genau parallele farbige Streifen durchzogen, welche, während die dem zusammengesetzten Raum gegenüberliegenden mit *e* parallelen Linien immer nach der Mitte hin abnehmen, sich in Winkel verwandelten, deren Schenkel den Seiten *d*, *f* parallel blieben. Diese Streifen erschienen aber erst, wenn die Platte so weit geneigt wurde, dafs sie farblos wurde, wobei die für das bloſse Auge als Sprünge sich darstellenden Stellen des Krystalls ebenfalls in lebhaften, anders gerichteten Streifen sich färbten.

Im polarisirenden Mikroskop untersucht, zeigten sich die homogenen Stellen einem rechts drehenden Individuum angehörig. Daneben erschien das gewöhnliche Ringsystem eines positiven einachsigen Krystalls, aufserdem aber eine Figur, welche man in Kalkspathszwillingen sehr häufig sieht. Denkt man sich die vier Quadranten in Fig. 22 des gewöhnlichen Ringsystems mit vier centralen Flecken, und den inneren Ring als aus vier gleichen, aber mehr als einen Quadranten betragenden Kreisbogen zusammengesetzt, so erhält man die eine Ansicht der Figur, welche sich, bei Drehung der Platte in ihrer Ebene in ein Ringsystem mit acht in einer Kreisperipherie herumliegenden, von einander gleich weit abstehenden Flecken verwandelt. Diese Veränderungen erschienen hier ebenfalls bei dem Drehen der Platte.

Herschel bemerkt, dafs die Anzahl der rechts drehenden plagiedrischen Bergkrystalle geringer ist als die der links drehenden. Von den im Handel vorkommenden Platten, welche zu Brillengläsern verschliffen werden, sind immer viel mehr links drehende als rechts drehende. Es ist daher bemerkenswerth, dafs unter 11 untersuchten Krystallen, welche sich als zusammengesetzte erwiesen, acht an den homogenen Stellen die Polarisationsebene nach Rechts drehten. Sollte sich dies durch weitere Beobachtungen bestätigen, d. h. sollten sich viel eher bei rechts drehenden Krystallen zusammengesetzte Stellen finden als bei links drehenden, so würde das Uebergewicht der Anzahl der links drehenden über die nur rechts drehenden noch vergröfsert werden.

Alle bisher beschriebenen Phänomene, die des letzten Bergkrystalls ausgenommen, erscheinen mehr oder minder deutlich auch bei Amethysten, doch sind bei denselben die vier in einander gewickelten Spiralen nie so deutlich, wie bei den Bergkrystallen, wo sie oft so vollkommen erscheinen, als man sie nur durch Combination gleich dicker, aber ungleichartiger Platten erhalten kann. Hingegen erscheint das positive einachsige System im Amethyst und Bergkrystall gleich deutlich. Daraus folgt unmittelbar, dafs im Amethyst die rechts und links drehenden Theile im Sinne der Achse neben einander liegen; in den Bergkrystallen hingegen, welche wir hier untersucht haben, in mehr oder weniger gegen die Achse des Hauptkrystalls senkrechten Schichten. Optisch analysirt, bei senkrechter Incidenz, verhalten sie sich daher wie hinter einander gelegte Platten, und deswegen findet bei dem Umkehren der Platte hier eine Umkehrung der Erscheinung statt, was bei dem Amethyst nicht der Fall ist. Bei dem Amethyst kann man daher auch die rechts und links drehenden Stellen vollkommen gesondert untersuchen, es finden sich eben deswegen immer beiderlei Ringsysteme in demselben Individuum mit den Uebergangsformen zwischen denselben. Bei den zusammengesetzten Bergkrystallen hingegen erscheint nur ein Ringsystem; das Vorhandensein des entgegengesetzt drehenden kann nur optisch geschlossen, nicht isolirt zur Erscheinung gebracht werden.

Das Gesammtresultat dieser Untersuchungen, deren Vervollständigung durch weitere Prüfungen wünschenswerth sein möchte, wäre demnach:

Die Bergkrystalle zerfallen optisch in drei Klassen:

1) in rechts drehende,
2) in links drehende,
3) in die Combination beider, und zwar:
   *a*) rechtsdrehende mit Stellen, wo sie wie combinirte Platten oder positive einachsige Krystalle sich verhalten,
   *b*) linksdrehende mit Stellen, wo sie wie combinirte Platten oder positive einachsige Krystalle sich verhalten,
   *c*) Amethyste, welche an bestimmten Stellen sich wie rechts drehende, an anderen wie links drehende, an den Uebergangsstellen sich wie positive einachsige Krystalle verhalten.

Als seltnere Modificationen von *a* und *b* treten bei einigen noch die Phänomene einachsiger Zwillinge hervor.

Das krystallographische Kennzeichen für 1 und 2 ist der Sinn, in welchem die Kantenzone der Trapezflächen um den Krystall herumliegt, Für *a* und *b* würden äufsere Kennzeichen das Vorkommen von beiderlei Trapezflächen, und die Abwechselung matter und spiegelnder Stellen auf den Pyramidal- oder Säulenflächen sein.

Die gegenseitige Lage und die Structur der drehenden und nicht drehenden Stellen in den zusammengesetzten Individuen scheint mir übrigens dafür zu sprechen, dafs die Eigenschaft des Drehens der eigentlich normale Zustand des krystallisirten Quarzes ist, und dafs die Stellen, wo er sich wie ein gewöhnlich positiver Krystall verhält, ein erst hervorgebrachtes Gleichgewicht zwischen entgegengesetzten Wirkungen darstellen.

Auch hat in der That später Soleil die hier beschriebenen natürlichen, zusammengesetzten Platten sehr schön nachgebildet, indem er zwei gleich dicke Platten, von denen die eine einem rechts, die andre einem links drehenden Individuum angehört, wie in Fig. 24 zusammenfügte. Da die Platten keilförmig zusammengefügt sind, so sieht man in der Mitte *c* eine dunkle Linie, zu beiden Seiten begrenzt durch weifse Räume.

In dieser dunkeln Linie wird die Drehung nach Rechts grade aufgehoben durch die Drehung nach Links, während zu beiden Seiten die eine über die andre überwiegt. Bei einer bestimmten Stellung des analysirenden Nicols erscheinen beide Platten gleich gefärbt, wenn die Berührungskante derselben grade in der Reflexionsebene des polarisirenden Spiegels liegt. Bei Drehung des Nicols nach rechts oder links vertauscht sich die Farbenfolge in der rechts und links drehenden Platte in genau gleicher Weise.

## 13. Depolarisation des Lichtes.

Es ist bekannt, dafs wenn Sonnenlicht durch eine Oeffnung auf eine noch so vollkommen spiegelnde Fläche fällt, man den beleuchteten Fleck nicht nur in der Reflexionsebene wahrnimmt, sondern auch in andern Ebenen. Während das Licht daher in der Einfallsebene gröfstentheils gespiegelt ist, wird ein Theil desselben in den andern Ebenen zerstreut. Von diesem zerstreuten Licht hat Arago gezeigt, dafs es stets in der Ebene polarisirt ist, in welcher es wahrgenommen wird. Fällt hingegen natürliches Licht senkrecht auf eine rauhe Fläche, z. B. eine weifse Wand, so wird es in allen Ebenen gleichmäfsig zerstreut, in keiner regelmäfsig reflectirt, und zeigt keine Spur von Polarisation, welche erst immermehr hervortritt, je schiefer es auf die rauhe Fläche einfällt. Das von einer spiegelnden Fläche zerstreute Licht unterscheidet sich also von dem von einer rauhen zerstreuten. Ist eine rauhe Fläche mit einer durchsichtigen spiegelnden bedeckt, so tritt dieser Unterschied deutlich hervor. Betrachtet man zum Beispiel ein mit einem glänzenden Firnifs überzogenes Gemälde mit einem Nicol'schen Prisma, so verschwindet der Glanz des Firnifs und man sieht in jeder Stellung das Bild deutlich. Derselbe Unterschied rauher und spiegelnder Flächen tritt hervor in ihren depolarisirenden Eigenschaften, wenn man nämlich unter Depolarisation die Zurückführung des polarisirten Lichtes auf den Zustand des natürlichen versteht. Läfst man senkrecht auf eine rauhe Fläche, z. B. eine weifse Wand oder einen Bogen Papier, geradlinig polarisirtes Licht fallen, so zeigt es sich vollkommen depolarisirt. Am einfachsten sieht

man diese Erscheinung, wenn man die senkrecht auf einander polarisirten Spectra eines Bergkrystallprismas auf eine solche Fläche fallen läfst, und dafs aus dem Uebergreifen des violetten Endes des einen über das rothe des andern resultirende Purpurroth mit einem Nicol'schen Prisma analysirt. Bei dem Drehen desselben zeigt es nicht die geringste Farbenänderung. Diese Depolarisation zeigt sich in gleicher Weise wenigstens fast eben so stark auf der rauhen Innenfläche mit einem glatten Ueberzuge bekleideter Körper. Sie erstreckt sich bei senkrechter Incidenz auch auf das circulare und elliptische Licht. Ist hingegen der auffangende Körper ein durchsichtiger oder undurchsichtiger Spiegel (eine Glasscheibe, ein schwarzer Spiegel oder ein ebener Metallspiegel), so zeigt sich das Licht, welches an dieser Fläche zerstreut wird, in keiner Ebene vollständig depolarisirt.

Von diesen Versuchen, welche ich vor vierzehn Jahren der Gesellschaft naturforschender Freunde in Berlin mittheilte, weifs ich nicht, ob sie damals neu waren, oder in wiefern sie es jetzt noch sind. Sie sollen hier nur den Uebergang bilden zu Erscheinungen der Depolarisation, welche im Detail auf die sie bedingenden Elemente zurückgeführt werden können.

Nach dem Gesetze der Reciprocität mufs, da natürliches, auf einen doppelbrechenden Körper fallendes Licht in zwei gleiche Mengen senkrecht auf einander polarisirten Lichtes getheilt austritt, die Vereinigung solcher gleichen Mengen unpolarisirtes geben. Darüber sind alle Physiker einig, nicht aber darüber, wie man sich natürliches Licht vorzustellen habe. Brewster nimmt an, dafs im polarisirten Licht die Schwingungsrichtungen in einer Ebene liegen, im theilweise polarisirten in zwei unter einem spitzen Winkel gegen einander geneigten, im natürlichen in zwei auf einander senkrecht stehenden, die meisten Physiker hingegen, dafs im natürlichen Licht gleichviel Schwingungsrichtungen in allen durch den Strahl gelegten Ebenen sich finden, im theilweise polarisirten ungleich viele, im polarisirten alle in eine Ebene fallen. Während Brewster seine Ansicht durch seine umfassende Arbeit über theilweise Polarisation und Compensation des polarisirten Lichtes zu bewähren gesucht hat, mufs es auffallen, dafs man bisher nicht einmal versucht hat,

ein natürliches Licht nach der Definition in allen Ebenen gleichmäfsig vertheilter Schwingungen herzustellen. Ich habe dies auf folgende Weise versucht.

In eine 4‴ dicke Glasplatte *ab* von 3″ Durchmesser wurde ein abgekürzter Hohlkegel *cdf* eingeschliffen, dessen kleinerer Kreisschnitt *cd* etwa 14‴ Durchmesser hatte, der gröfsere 17‴. Die Grundflächen des Glases wurden um den Rand der Kreisschnitte mattgeschliffen und geschwärzt, und der gröfsere Kreisschnitt mit einer Glasfläche *ag* bedeckt, auf welche ein kreisförmiges Staniolblatt von 14‴ Durchmesser so aufgeklebt war, dafs sein Mittelpunkt in die Achse des abgekürzten Kegels fiel. Der Winkel des Kegels an der Spitze betrug 70° 50′. Kehrt man diese Vorrichtung der Sonne zu, so dafs die Strahlen *oe, op, oc, od, or, of* lothrecht auf die Grundfläche des Kegels fallen, so werden sie in dem ringförmigen Zwischenraume *elmf* zwischen dem Staniolblatt und der dunkeln Bekleidung der Scheibe eindringen und auf die spiegelnde Fläche des Hohlkegels unter 30° 25′ geneigt treffen, daher in allen die Kegelfläche tangirenden Reflexionsebenen polarisirt werden und sich nach der Reflexion in den Punkten *s, u, o* der Achse kreuzen. Dieser kleine Kreis fiel bei der angewendeten, von Herrn Oertling ausgeführten Vorrichtung gerade in die Ebene der kleinen Kegelöffnung, und wurde sichtbar, wenn man ihn hier mit einer weifsen Papierfläche auffing. Da wegen der depolarisirenden Wirkung dieser rauhen Fläche das polarisirte Licht depolarisirt werden würde, so konnte nur untersucht werden, dafs es unpolarisirt auffiel. Dies geschah dadurch, dafs vermittelst eines Satzes Glasscheiben das auf den Kegel auffallende Licht polarisirt wurde, und zwischen dem Glassatze und dem Kegel ein Glimmerblatt eingeschaltet wurde. Der Punkt blieb farblos.

## 14. Die Absorption des polarisirten Lichtes in doppelbrechenden Krystallen als Unterscheidungsmittel ein- und zweiachsiger Krystalle.

Da man einen einachsigen Krystall als einen zweiachsigen ansehen kann, dessen optische Achsen zusammengefallen sind,

so ist unmittelbar klar, dafs die optischen Erscheinungen, welche zweiachsige doppelbrechende Krystalle mit grofsem Achsenwinkel zeigen, durch alle mögliche Mittelstufen in den Krystallen mit kleinem Achsenwinkel in die einachsigen übergehen. Die experimentelle Beantwortung der Frage, ob ein Krystall ein ein- oder zweiachsiger sei, bietet also desto gröfsere Schwierigkeiten dar, je kleiner dieser Achsenwinkel ist. Diesem Umstande ist es zugeschrieben, dafs besonders bei den Glimmern viele später als zweiachsig erkannt worden sind, welche früher als einachsig galten. Ich habe für die Glimmer, glaube ich, darauf zuerst aufmerksam gemacht, als ich vor zehn Jahren (Pogg. Ann. 58, p. 158) zeigte, dafs ein Glimmer von Jefferron County, der nach der Analyse von Meitzendorff wegen seines grofsen Magnesiagehalts für einachsig gegolten hatte, zweiachsig sei. Ich untersuchte damals eine grofse Anzahl in der Berliner Mineraliensammlung befindlicher Glimmer, und fand dasselbe Resultat an vielen, welche mir als einachsig übergeben worden waren. Dasselbe Ergebnifs erhielt später Poggendorff an einem von H. Rose analysirten Glimmer vom Beickalsee, der von Seebeck als einachsig bestimmt worden war, und neuerdings sind diese Beispiele durch die Untersuchungen von Silliman und Senarmont wesentlich vermehrt worden. Die Ansichten der Naturforscher sind daher jetzt getheilt, einige nehmen an, dafs es überhaupt keine einachsigen Glimmer gebe, sondern dafs die für einachsig geltenden sämmtlich zweiachsige mit kleinen Winkeln sind, andre hingegen, dafs die zweiachsigen mit kleinen Achsenwinkeln ursprünglich einachsige waren, welche durch mechanische Einflüsse in den Zustand zweiachsiger versetzt worden sind. So sagt Miller[1]): »einige Glimmerarten zeigen zwei optische Achsen, welche einen sehr kleinen Winkel mit einander bilden. Möglicher Weise waren dieselben in ihrem ursprünglichen Zustande einachsig. Die Trennung der einzigen optischen Achse in zwei mag durch den Zustand der Spannung entstanden sein, welcher in dem Krystall durch das Trennen und Abspalten hervorgerufen wurde. Die Ansicht von Senarmont[2]) ist eine andre. Nach ihm giebt es

[1]) Phillips an elementary introduction to Mineralogy. Lond. 1852 p. 388.

[2]) Ann. de Chim. et de Phys. 3 ser. 34 p. 171.

nur optisch zweiachsige Glimmer, aber die Ebenen, in welchen sich die beiden Achsen öffnen, stehen, wie zuerst Silliman [1]) gezeigt hat, in verschiedenen Glimmern auf einander senkrecht. Dies komme daher, dafs die optischen Eigenschaften des Glimmers bedingt seien durch die verschiedene Mengung gewisser isomorpher Verbindungen, welche entgegengesetzte optische Wirkung äufsern. Das Studium der optischen Erscheinungen des Glimmers müsse daher zunächst an die Individuen angeknüpft werden, welche als Extreme einander gegenüberstehen, d. h. welche grofse Achsenwinkel in auf einander senkrechten Ebenen zeigen, nicht aber an die sogenannten einachsigen, welche jene isomorphen Verbindungen in optisch aequivalenter Gröfse enthalten.

Das gewöhnliche Verfahren, einen Glimmer optisch zu untersuchen, besteht darin, dafs man die Gestalt der isochromatischen Curven zu bestimmen sucht, und untersucht, ob das schwarze Kreuz, welches die Ringe durchschneidet, bei dem Drehen der Platte sich in hyperbolische Aeste öffnet oder nicht. Aber die bekannten Erscheinungen am Beryle zeigen, wie trügerisch dieses Verfahren ist, und wir wissen, dafs das *tissu lamellaire,* wie es Biot nennt, selbst Krystallen die nicht doppelbrechend sind, das Gepräge doppelbrechender aufdrückt. Bei sehr dünnen Blättchen, in welchen das Ringsystem zu grofs wird, um die Gestalt desselben zu untersuchen, habe ich es vortheilhafter gefunden, eine auf die Achse senkrecht geschnittene Kalkspathplatte im Polarisationsapparat zu betrachten, und zwischen diese und den analysirenden Nicol das Glimmerblättchen einzuschalten. Verändert sich die gesehene Figur des Kalkspaths bei dem Drehen des Blättchens in seiner Ebene in die bekannte Abänderung derselben, wenn lineares Licht in elliptisches verwandelt wird, so gehört das Blättchen einem zweiachsigen Krystall an unter der Voraussetzung, dafs die Ebene des Blättchens lothrecht steht auf der Ebene des einfallenden Strahls. Da aber die Blättchen oft gekrümmt sind, und sich, wenn sie spröde sind, schwer in eine Ebene spannen lassen, so kann oft diese letztere Bedingung nicht genau erfüllt werden, und indem die Achse eines einachsigen Krystalls bei der Drehung einen Kegel

[1]) Amer. Journ. of Science 2. ser. 10, p. 373.

beschreibt, statt sich in sich zu drehen, ein einachsiger Krystall für einen zweiachsigen angesehen werden. Diese Uebelstände liefsen es mir lange wünschenswerth erscheinen, ein andres Verfahren für diese Unterbrechungen zu finden, und ich erhielt dies in den dichroitischen Eigenschaften der farbigen Krystalle, bei denen eben wegen der Färbung des einfallenden Lichts jene Verfahrungsmethoden die gröfste Schwierigkeit darboten.

Absorbirt ein Krystall die beiden senkrecht auf einander polarisirten Lichtmengen, in welche er das Licht durch Doppelbrechung theilt, in ungleichem Grade, so werden die beiden Bilder, wenn sie getrennt erscheinen, ungleiche Intensität haben, sie werden zugleich gefärbt erscheinen, wenn die Absorption von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes abhängt. Für geringe Unterschiede der Intensität ist das Auge aber wenig empfindlich, eben so wenig für geringe Farbenunterschiede. Diese Empfindlichkeit ist aber sehr grofs für das Wahrnehmen einer bestimmten Gestalt, diese mag nun entweder als einfache Verdunkelung in einer bestimmten Beleuchtung hervortreten, oder als ein Farbenunterschied von derselben.

Linear polarisirtes Licht giebt in einem doppelbrechenden Körper bekanntlich nur zu Farben Veranlassung, wenn es nach seinem Austritt aus demselben analysirt wird, d. h. wenn es den Bedingungen unterworfen wird, welche es, wenn es natürliches wäre, polarisiren würden. Diese Bedingungen sind: Trennung durch Doppelbrechung, Trennung durch Spiegelung und einfache Brechung, endlich ungleiche Absorption in den Krystallen, die gewöhnlich dichroitische genannt werden. Daraus geht hervor, dafs das Hervortreten einer Farbenfigur an der in den Polarisationsapparat gehaltenen doppelbrechenden Platte einen Rückschlufs auf die ungleiche Absorption des zur Analyse angewendeten Minerals gestaltet, unter der Voraussetzung nämlich, dafs jene beiden andern Arten der Entstehung vermieden wurden.

Das von mir angewendete Verfahren ist nun folgendes. In einem gewöhnlichen Polarisationsapparat mit Spiegel wurde in der Weite des deutlichen Sehens eine gekühlte quadratische Glasscheibe von $1\frac{1}{2}$ Zoll Seite aufgestellt und der analysirende Spiegel fortgenommen. An der Stelle desselben wurde nun die zu un-

tersuchende Krystallplatte dicht vor das Auge gehalten und durch dieselbe die gekühlte Glasplatte betrachtet. Dabei wird die Krystallplatte so in ihrer Ebene gedreht, dafs sie bei dieser Drehung senkrecht gegen den reflectirten Strahl bleibt und gesehn, ob auf dem gekühlten Glase die Figur erscheint, welche bei der Drehung um 90 Grad sich in die complementare verändern mufs.

Linear polarisirtes Licht, senkrecht auf eine Turmalinplatte fallend, zeigt keine Veränderung seiner Intensität, wenn diese Platte in ihrer Ebene gedreht wird, unter der Voraussetzung, dafs die Platte senkrecht auf die Achse des Turmalins geschnitten ist. Diese Veränderung tritt aber hervor, wenn die Achse in der Platte geneigt gegen die parallele Vorder- und Hinterfläche derselben ist, und am stärksten, wenn sie diesen Oberflächen parallel ist. Daher sieht man, wenn diese Platte als analysirende Vorrichtung angewendet wird, im ersten Falle in dem gekühlten Glase keine Farbenfigur, im zweiten sie hervortreten, im dritten am deutlichsten werden. Dasselbe gilt von der braungelben Varietät des Bergkrystalls, welche gewöhnlich Rauchtopas genannt wird. Selbst mehrere Zoll dicke Platten zeigen keine Spur der Figur, wenn sie senkrecht auf die Achse geschnitten sind, hingegen tritt diese äufserst lebhaft hervor, wenn man durch die Seitenflächen des Krystalls nach dem gekühlten Glase blickt. Babinet[1]) hat bereits gezeigt, dafs der Rauchtopas Licht, dessen Polarisationsebene senkrecht auf seiner Achse steht, stärker absorbirt, als das, dessen Ebene damit zusammenfällt, während bekanntlich bei dem Turmalin das Entgegengesetzte stattfindet. Daher sieht man bei einem Turmalin auf der gekühlten Glasplatte die Figur mit schwarzem Kreuz, wenn die Achse desselben in der Reflexionsebene des polarisirenden Spiegels liegt, hingen das weifse, wenn sie senkrecht darauf steht, bei einem Rauchtopas hingegen das weifse Kreuz, wenn seine Achse der Reflexionsebene parallel, und das schwarze, wenn sie darauf lothrecht ist. Daher verdunkelt ein Rauchtopas einen Turmalin viel stärker, wenn ihre Achsen parallel sind, als wenn sie sich rechtwinklig kreuzen. Dies führt zu der Annahme, zu der man auch von vornherein aus theoretischen Gründen berechtigt war,

[1]) Compt. rend. 7, p. 832.

dafs sowohl in den negativen als positiven einachsigen Krystallen die Absorption des polarisirten Lichtes längs der Achse dieselbe ist, in welcher den durch dieselbe gelegten Ebenen das in der Richtung der Achse einfallende Licht auch polarisirt sei, oder mit andern Worten, dafs die auf Absorption gegründete polarisirende Wirkung in der Richtung der Achse bei einachsigen Krystallen Null ist.

Eine auf die Halbirungslinie des Winkels der optischen Achsen senkrecht geschliffene Platte eines zweiachsigen Krystalls zeigt Ungleichheiten der Absorption für Licht, welches in den verschiedenen durch diese Halbirungslinie gelegten Ebenen polarisirt ist, und diese Unterschiede erreichen ihre Maxima in der durch die optischen Achsen und lothrecht darauf gelegten Ebene. Betrachtet man daher durch eine solche Platte als analysirende Vorrichtung das gekühlte Glas, so wird das Hervortreten der Farbenfigur auf derselben zunächst ein Beweis sein, dafs der Krystall, aus dem sie genommen, ein zweiachsiger, aus den beide Maximis der Deutlichkeit des Hervortretens der entgegengesetzten Figuren zugleich sich die durch die optischen Achsen und die darauf lothrechte Ebene bestimmen lassen. Diese Untersuchungsart ist unabhängig von der Gröfse des Achsenwinkels, denn wie klein diese auch sei, so wird doch dadurch eine Ebene bestimmt. Sie läfst sich aufserdem auf die kleinsten Blättchen anwenden, da diese unmittelbar vor das Auge gehalten werden und ist unabhängig von einer Beurtheilung eines Farbenunterschiedes.

Betrachtet man durch eine dicke Scheibe des grofsplattigen sibirischen Glimmers mit grofsem Achsenwinkel das gekühlte Glas, so sieht man die Figur sehr deutlich, aber in andern Farben, als durch die Analyse vermittelst Doppelbrechung oder Spiegelung oder einfache Brechung. Fällt die durch die optische Achse gelegte Ebene des analysirenden Glimmers mit der Reflexionsebene des polarisirenden Spiegels zusammen, so sieht man das dunkle Kreuz, aber stark ins Röthliche ziehend, stehen hingegen jene beiden Ebenen lothrecht auf einander, so erscheint das helle Kreuz ziemlich weifs, die vier es begrenzenden Bogen aber rosa (bei einigen zweiachsigen Glimmern gelblich). Man sieht

daher hier dieselben Linien roth, welche bei Anwendung eines Dichroits als analysirende Vorrichtung tief blau erscheinen. Dieses Roth ist eine objective Farbe, denn es verdunkelt sich durch ein hinzugefügtes grünes Glas zu dunklem Grau, während vielleicht das grünliche Weifs nur subjectiv gefärbt ist, da die letztere Figur in der rothen Beleuchtung eines Ueberfangglases fast vollständig verschwindet.

Ich untersuchte nun Glimmerarten mit kleinem Achsenwinkel, welche früher als einachsige mir bezeichnet worden waren, einen in dickern Schichten blutrothen in England ohne Angabe des Fundorts gekauften, den tombacbraunen vom Baikalsee, grüne Varietäten aus Sibirien, in gröfsern Dicken durchsichtig oder sich bald mit zunehmender Dicke zu Schwarz verdunkelnd, einen grünlichen von Monroe in Nordamerika, endlich einen etwas ins Bläuliche ziehenden grünen von Schwarzenberg im Zillerthal. Besonders in den beiden ersten tritt die rothgefärbte Figur äufserst intensiv hervor, schwächer in den grünen Varietäten von Sibirien, obgleich noch sehr deutlich, weniger in dem von Monroe, aber nicht in dem von Schwarzenberg. Wenn nun auch das Fehlen der polarisirenden Wirkung nicht als ein Beweis gelten kann, dafs der untersuchte Krystall ein einachsiger sei, da sie vielleicht dennoch bei gröfserer Dicke der Platte sichtbar werden würde, so kann das Hervortreten derselben hingegen gewifs als ein Beweis angesehen werden, dafs derselbe ein zweiachsiger sei.

Es wäre nun sehr interessant zu wissen, ob die Unterschiede, welche Silliman in der Lage der Ebenen, in welcher in Beziehung auf die Krystallgestalt die Achsen liegen fand, auch für die Absorption des polarisirten Lichtes hervortreten.

Obgleich aus dem blofsen Anblick schon hervorgeht, dafs die Stärke der Absorption des polarisirten Lichtes nicht von der Gröfse des Achsenwinkels abhängt, so ist eine eigentliche Vergleichung der Intensität der Wirkung doch nur durch messende Bestimmungen zu erhalten. Wegen des Mangels photometrischer Methoden besonders bei Licht, dessen Farbe sich ändert, kennt man aber weder das Gesetz, nach welchem die Absorption des polarisirten Lichtes in einachsigen Krystallen mit Vermehrung der Neigung gegen die Achse zunimmt, noch wie

sie sich vermehrt mit Zunahme der Dicke der durchstrahlten Schicht, eben so wenig besitzt man Mittel, verschiedene Krystalle bei gleicher Dicke der Platten und gleicher Lage derselben in Beziehung auf die optische Achse oder die Halbirungslinie zweier mit einander zu vergleichen. Das früher [1]) (p. 222) von mir angegebene Compensationsverfahren gestattet aber, diese Frage zu beantworten.

Natürliches Licht, welches einen Krystall durchstrahlt, dessen Absorption für ein in einer bestimmten Ebene polarisirtes Licht gröfser ist, als für das darauf senkrechte, wird aus diesem im Allgemeinen theilweise polarisirt austreten. Es wird daher in natürliches Licht verwandelt werden, wenn die ungleich gewordenen Mengen rechtwinklig auf einander polarisirten Lichtes durch Unterdrückung des Ueberschusses gleich gemacht werden. Ein solcher Krystall wird daher seine polarisirende Eigenschaft oder, was dasselbe ist, seine Fähigkeit, als analysirende Vorrichtung zu dienen, verlieren, wenn durch eine hinzugefügte neue analysirende Vorrichtung eben so viel polarisirtes Licht unterdrückt wird, als er als Ueberschufs hindurch liefs. Kann man nun jene messen, so ist diese bestimmt.

Aus den theoretischen, durch Brewster's Messungen bestätigten Untersuchungen von Fresnel, über die Ablenkung der Polarisationsebene des Lichtes, welches unter irgend einem Winkel und in irgend welchem Azimuth polarisirt, eine durchsichtige Scheibe durchstrahlt, läfst sich bestimmen, welcher Antheil polarisirten Lichtes in dem aus der Glasplatte austretenden Licht enthalten ist, welches als natürliches unter irgend einem Winkel auf dieselbe oder auf ein System paralleler Platten fiel. Es ist daher klar, dafs man die Neigung oder die Zahl der Scheiben eines polarisirenden Glassatzes so lange verändern kann, bis er dieselbe polarisirende Wirkung hervorbringt, als vorher der durch Absorption polarisirende Krystall. Von der Gleichheit beider Wirkungen überzeugt man sich aber, wenn sie im entgegengesetzten Sinne gleichzeitig wirkend einander neutralisiren. Das Verfahren der Messung ist daher folgendes: Nachdem man

[1]) Berichte der Berl. Akad. 1847, p. 71.

durch das dichroitische Mineral als analysirende Vorrichtung das Maximum der Wirkung hervorgebracht hat, d. h. es so lange in seiner Ebene gedreht, bis das Hervortreten der Farbenfigur auf dem gekühlten Glase in gröfster Deutlichkeit erfolgt, welche, wenn die Lage der optischen Achsen bekannt ist, auch unmittelbar bestimmt werden kann, bringt man zwischen demselben und dem Auge den Glassatz an, und zwar zunächst in der Stellung, in welcher er nicht auf das Licht polarisirend wirkt, also lothrecht auf das von dem Polarisationsspiegel reflectirte Licht. Wir wollen annehmen, dafs durch das analysirende Mineral das helle Kreuz hervorgebracht sei, dann mufs bei der Drehung des Glassatzes die Brechungsebene desselben stets mit der Reflexionsebene des Spiegels zusammenfallen, die Drehung desselben also um eine auf diese Ebene lothrechte Linie erfolgen. Es ist klar, dafs wenn die polarisirende Wirkung des Glassatzes überwiegt, statt des hellen Kreuzes die Figur mit dunklem Kreuze hervortreten wird, und dafs der Moment des Ueberganges des hellen in das dunkle die Bestimmung für die Intensität der durch den dichroitischen Krystall hervorgebrachten Absorption giebt. Ich habe auf diese Weise gefunden, dafs oft Glimmer mit kleinem Achsenwinkel bei gleicher Dicke der Platte stärker polarisiren, als ebenfalls gefärbte mit grofsen Achsenwinkeln.

Um für verschiedene Dicken der Platten desselben Minerals die Absorption zu erhalten, schleift man bei harten Krystallen, wie z. B. Rauchtopas, aus der Säule desselben zwei gleiche Prismen, welche keilförmig zu combinirten Platten zusammengelegt werden, und deren parallele Flächen auf diese Weise einen beliebigen Abstand von einander erhalten. Die zur Compensation der Absorption durch die verschiedenen Dicken erforderlichen verschiedenen Neigungen des Glassatzes geben die Bestimmung der Zunahme der Absorption mit wachsender Dicke. Bei leicht spaltbaren Mineralen wie Glimmern erhält man die erforderlichen Dicken durch Abspalten und Messung vermittelst des Sphärometers. Die Abnahme der Absorption, wenn das zuerst senkrecht auf die Achse einfallende Licht zuletzt dieser parallel wird, kann nur an Krystallen studirt werden, deren

absorbirende Wirkung vollkommen symmetrisch um die Achse vertheilt ist.

So unbekannt nämlich auch noch die Ursachen des Dichroismus sind, so zeigt sich doch entschieden, dafs die Färbung der Mineralien in innigem Zusammenhang steht mit ihrer Eigenschaft, polarisirtes Licht nach verschiedenen Richtungen verschieden zu absorbiren. Abgesehn nämlich davon, dafs in dieser Beziehung z. B. verschiedene Individuen unter den Turmalinen sich so sehr von einander unterscheiden, zeigt sich dies auch an einzelnen Stellen desselben Individuums. Ich verdanke Herrn Darker in London eine Turmalinplatte, welche aus einem Krystalle geschnitten ist, dessen Säule, wie es häufig vorkommt, unten fast vollkommen farblos erscheint, von einer bestimmten Stelle aber an immer tiefer violett wird. Die polarisirende Wirkung dieser Platte nimmt nun von den hellen Stellen zu den violetten in sehr auffallender Weise zu, und da die Grenze des Violett schief gegen die Achse geneigt ist, so sieht man, dafs bei solchen Krystall-Individuen die absorbirende Wirkung des polarisirten Lichtes nicht symmetrisch um die Achse vertheilt ist, sondern in verschiedenen durch die Achse gelegten Ebenen von verschieden grofsen Maximis zu Null abnimmt.

Wäre es möglich, farblose Bergkrystalle künstlich durch und durch zu färben, wie man es mit dem calcedonartigen Quarze kann, so würde man vielleicht den Dichroismus künstlich nachbilden können.

Brewster behauptet, er habe in farblosem Bergkrystall dichroitische Wirkungen durch Anrufsen desselben hervorgebracht, das gewöhnliche Bild desselben wäre amethystfarben geworden, das ungewöhnliche gelbbraun. Ich habe dies nicht bestätigt gefunden. An einem farblosen Bergkrystall wurde eine Seitenfläche angeschliffen, so dafs sie mit einer der polirten natürlichen Säulenflächen ein Prisma bildete, dessen Kante der Achse parallel war und durch ein darauf gekittetes Glasprisma die beiden Bilder nahe vollständig achromatisirt. Dieses achromatische Prisma wurde nun angerufst und durch dasselbe die Spalte einer Diffractionsschneide betrachtet. Beide Bilder blieben gleich gefärbt, mochte nun natürliches oder polarisirtes Licht

die Spalte beleuchten. Bei dem Drehen des Prismas verdunkelt sich im letztern Falle das eine Bild, und dies kann möglicherweise dann subjectiv gefärbt erscheinen. Auch kann ja ein Berufsen keine andre Wirkung hervorbringen, als das auf den farblos bleibenden Krystall fallende Licht färben, und so viel ich sehe, könnte, wenn der Krystall verschieden farbiges Licht ungleich absorbirte, es unmöglich farblos erscheinen. Auch zeigt sich an angerufsten, der Achse parallel geschnittenen Bergkrystallscheiben keine Spur von ungleicher Absorption für Licht, dessen Polarisationsebene der Achse parallel ist und dem, wo diese senkrecht darauf steht, was bisher wenigstens das Kennzeichen jedes Dichroismus gewesen ist. Eine tiefgelbe Glasscheibe stark durch plötzliches Abkühlen gehärtet, so dafs auf ihr im Polarisationsapparat die Farbenfigur sich sehr schön entwickelte, zeigte als analysirende Vorrichtung keine absorbirende Wirkung. Ich prefste sie durch eine Schraube zusammen und nun zeigte sich eine Wirkung, aber bei näherer Untersuchung fand sich, dafs sie wie ein Zwillingskrystall wirkte und dadurch zwei nahe über einander liegende farbige complementare Bilder gab. Hier war also nur ein scheinbarer Dichroismus künstlich erzeugt, auch zeigte in der That ein gekühlter farbloser Glascylinder bei dem Pressen dasselbe, nicht aber ein ungehärteter, wenn er durch Pressen doppelbrechend gemacht wurde.

Diese Zwillingsbildungen treten sehr störend auf, wenn man Arragonit und Diopsid auf ähnliche Weise untersucht wie den Glimmer. Im Schwerspath und chromsauren Kali zeigen sich die Wirkungen viel entschiedener, als im Salpeter, Eisenvitriol und Gyps. Im farblosen Topas aus Brasilien habe ich senkrecht auf die Halbirungslinie der optischen Achsen keine verschiedene Absorption bemerkt, die bei farbigen, wie im Beryle, senkrecht auf die Achse der Säule deutlich hervortrat.

Der Parallelismus, der sich bisher zwischen den Absorptionserscheinungen des Lichtes und der strahlenden Wärme in Beziehung auf Turmalin nach Forbes und Melloni und Rauchtopas nach Knoblauch's Versuchen gezeigt hat, läfst vermuthen, dafs sich derselbe auch für die Glimmer und andre Krystalle nachweisen läfst. Die Nachweisung desselben in Beziehung

auf den Glimmer wäre interessant, weil auf diese Weise dadurch nachgewiesen würde, dafs auch für die Erscheinungen der Wärme die zweiachsigen Krystalle sich von den einachsigen unterscheiden. Da nach den Untersuchungen von Silliman und Blake die Durchwärmigkeit verschiedener Glimmerarten sehr verschieden ist, so zeigen sich für die Glimmer vielleicht hier ähnliche Unterschiede, wie in Beziehung auf das Licht für die Turmaline. Auch werden, wenn die Absorption von der Wellenlänge abhängt, wie es schon von Forbes für die Turmaline nachgewiesen wurde, die optisch stark wirksamen vielleicht ganz andre sein, als die thermisch kräftig wirkenden. Bei allen diesen Untersuchungen mufs aber die zu untersuchende Platte so genau wie möglich senkrecht gegen den einfallenden Strahl gehalten werden, da, wenn man den Krystall neigt, er wie ein Glassatz polarisirend wirkt, und man daher die auf Absorption gegründete polarisirende Wirkung eines Krystalls durch Neigung compensiren oder steigern kann.

Die stärkste Licht polarisirende Wirkung habe ich unter den zweiachsigen Krystallen an einer Platte von Zucker bemerkt, senkrecht auf die Säulenflächen geschliffen, also parallel der einen optischen Achse. Die Platte war zwischen Glasplatten durch Canadabalsam befestigt, etwa $\frac{1}{3}$ Linie dick, der Zucker farblos und die auf der Glasplatte entstehenden Farben so rein wie bei der Analyse durch Spiegelung. Die auffallende Intensität der Wirkung, mit Farblosigkeit des Krystalls verbunden, stellt diesen Fall als einen bisher isolirten dar. Auch ist möglicherweise hier eine andre Ursache mitwirkend. Betrachtete man nämlich durch die Platte eine runde Oeffnung, so erschien dieselbe mit einem diffusen Lichtschein umgeben. Es wäre also möglich, dafs hier Zerstreuung statt Absorption wirkte.

# V. Versuche über subjective Farben[1]).

## 1. Doppelbilder auf farbigen Gläsern[2]).

Läfst man den Schatten eines schmalen, undurchsichtigen Körpers, z. B. eines Stabes, von den Dimensionen eines dünnen Bleistifts auf ein farbiges Glas fallen, welches mit seiner untern Fläche auf einem ebenen Metallspiegel liegt oder unten mit Spiegelfolie belegt ist, so sieht man zwei lebhaft complementar gefärbte Bilder des Gegenstandes, das eine von viel tieferer Farbe als die der unbeschatteten Theile des Glases, das andre complementar zu dieser Farbe. Die Entstehung dieser Farben ist von Fechner näher erörtert worden. Die nachfolgenden Versuche bezwecken auf eine möglichst directe Weise zu untersuchen, welche Lichtmassen zusammenwirken, um diese Erscheinungen hervorzurufen.

Bezeichnet (Fig. 26) $cd$ den Querschnitt eines schmalen undurchsichtigen Körpers, $ab$ die Projection seines Schattens auf die Vorderfläche des farbigen Glases, so sieht ein bei $m_{\text{I}}, m_{\text{II}}$ befindliches Auge an dieser Stelle nur das von der Hinterfläche bei $a_{\text{I}}, b_{\text{I}}$ reflectirte Licht, also dieselbe Erscheinung, als wenn Licht durch eine Spalte von der Breite $cd$ gegangen wäre, und durch eine Glasscheibe von der Dicke $m_{\text{I}} a_{\text{I}} a$, deren Mächtigkeit für jeden gegebenen Einfallswinkel aus dem bekannten Brechungsverhältnifs des Glases sich unmittelbar bestimmen läfst. An der Stelle $ab$ ist aber aufserdem Licht abgehalten worden einzudringen, die Stelle $\alpha\beta$ erhält also von der untern Fläche des Glases kein Licht, ein in $o_{\text{I}} o_{\text{I}}$ befindliches Auge sieht daher in $\alpha\beta$ nur die von der Vorderfläche reflectirten Strahlen $o\alpha$, $o\beta$. An dieser Stelle erscheint daher ein zweites Bild, da alle übrigen Stellen des Glases, $ab$ ausgenommen, sowohl Licht von der Vorderfläche als von der Hinterfläche ins Auge senden. Ist das

[1]) Hierher gehören aufserdem die pag. 173 und pag. 218 angeführten Versuche.

[2]) Pogg. Ann. 45, p. 158.

einfallende Licht weifs, so sendet die Stelle $\alpha\beta$ daher weifses Licht ins Auge, $ab$ durch Absorption gefärbtes, die andern Stellen eine Mischung beider. Es ist nun die Frage, welches Licht zu der subjectiven complementaren Färbung von $\alpha\beta$ mitwirkt.

Hat das angewendete farbige Glas eine bedeutende Dicke, so dafs beide Bilder weit aus einander treten, so ist es leicht, einen undurchsichtigen Schirm in den Weg der reflectirten Strahlen $m_{11}m_{11}$ einzuschalten, so dafs $ab$ verdeckt wird, während $\alpha\beta$ sichtbar bleibt. Da die complementare Färbung dann sehr lebhaft fortdauert, so ist klar, dafs der Anblick von $ab$ nicht wesentlich ist zur Hervorbringung des Farbeneindrucks von $\alpha\beta$. Betrachtet man aber unter dem Polarisationswinkel des angewendeten Glases dasselbe mittelst eines Nicol'schen Prismas, so wird das von der Vorderfläche des Glases reflectirte Licht bei der Drehung desselben um seine Achse endlich völlig verschwinden. In diesem Falle erhält man also von allen Theilen des Glases dieselbe tiefe Farbe, als vorher von der Stelle $ab$ allein, daher verschwindet bei Anstellung des Versuches das an dieser Stelle vorher sichtbare Bild vollkommen, vorausgesetzt nämlich, dafs die Breite $cd$ des Stäbchens nicht bedeutend sei, weil sonst nicht für alle Theile der beschatteten Stelle der Bedingung des Polarisationswinkels genügt werden kann. Bei dem Verschwinden von $ab$ wird nun das vorher complementar gefärbte $\alpha\beta$ ein vollkommen farbloser dunkler Schatten. Dies ist ein entscheidender Beweis dafür, dafs eine beschattete Stelle in einer gleichförmig farbigen Beleuchtung nicht zu subjectiven Farben Veranlassung giebt [1]).

[1]) Bei solchen Versuchen geben Schatten ein bestimmteres Ergebnifs, als schwarze Körper in einer gleichförmig farbigen Umgebung, weil dieselben in der Regel noch gespiegeltes Licht ins Auge senden. Betrachtet man z. B. einen schwarzen Druck auf einem ins Orange ziehenden gelben Papier (z. B. die Apothekersignaturen von Hotop in Kassel), so erscheinen sie, wenn man den Reflex vermeidet, vollkommen schwarz bei senkrechtem Daraufsehen. Hält man sie hingegen schief, so dafs das diffuse Tageslicht von der etwas glänzenden Schrift reflectirt wird, so steigert sich die subjective blaue Färbung so, dafs es zuletzt unmöglich wird, die Buchstaben nicht für wirklich farbig zu halten. Ueberhaupt zerstreuen selbst rauhe

Betrachtet man das auf einem grünen Glase entstehende grüne Bild $ab$ und rothe Bild $\alpha\beta$ durch ein homogen rothes Glas, so verschwindet das rothe Bild $\alpha\beta$ vollkommen, während das grüne $ab$ farblos dunkel wird. Eben so verschwindet auf einem orangenen Glase das blaue Bild, wenn es durch ein rein blaues Glas betrachtet wird, wobei das orangene Bild sich zu einem schwarzen Schatten verdunkelt, endlich auf einem blauen Glase das orangene Bild, wenn man es durch ein orangenes Glas betrachtet, wobei das blaue schwarz wird. Dies Verschwinden ist minder vollkommen, wenn man dieselben dioptrischen Mittel, statt zwischen das Auge und das Glas einzuschalten, von dem einfallenden Lichte, ehe es die spiegelnde Fläche erreicht, durchstrahlen läfst. So auffallend diese Versuche bei dem ersten Anblick erscheinen, so lassen sie sich doch auf ihre bedingenden Ursachen leicht zurückführen. Betrachtet man nämlich ein auf dem Metallspiegel liegendes grünes Glas von recht reiner Farbe durch ein Nicol'sches Prisma, so erscheint, wenn das von der Vorderfläche reflectirte Licht fortgeschafft ist, die Farbe des Glases durch alleinige Reflexion von der Hinterfläche in überraschender Intensität. Betrachtet man dieses Grün aufserdem noch durch ein rothes Glas, so erscheint die spiegelnde Glastafel vollkommen schwarz. In den vorhergehenden Versuchen, ohne Anwendung einer polarisirenden Vorrichtung, wurde das von der Hinterfläche reflectirte Licht daher durch Absorption vernichtet; man hatte hier also nur Licht von der Vorderfläche,

schwarze Flächen das Licht weniger als weifse, denn bei schiefer Incidenz erhält man vom Sammet und von einer sorgfältig angerufsten rauhen Metallfläche noch Polarisationsfarben, welche man in einer mit Bleiweifs gefärbten kaum wahrnehmen kann. Am intensivsten tritt unter der Zusammenwirkung des Tageslichts und Gas oder Lampenlichts die blaue subjective Farbe hervor, wenn bei der Dämmerung in einem Saale ein Kronleuchter angezündet wird, und man nun die sich allmählig verdunkelnden Fenster ins Auge fafst, die zuletzt von tief blauem Glase zu sein scheinen, bis beim vollkommnen Verschwinden des Tageslichts sie farblos dunkel werden. Auf ähnliche Weise färben sich die dunkeln Interferenzcurven in einen Polarisationsapparat, wenn man bei Tage sie in einer homogenen gelben Beleuchtung entwickelt, nicht aber wenn dies in einem dunkeln Zimmer geschieht.

daher verhalten sich alle Theile der Glasoberfläche, $ab$ ausgenommen, wie $\alpha\beta$, welches deswegen verschwinden mufste. In diesem Falle, wie in dem vorhergehenden erschien daher in einer gleichförmig farbigen Beleuchtung keine subjective Färbung des Schattens.

Von den Modificationen der Färbung beider Bilder, wenn man nicht monochromatische Gläser anwendet, wird man sich auf dem angegebenen Wege leicht Rechenschaft geben.

Um zu entscheiden, ob das von der Vorder- und Hinterfläche reflectirte Licht mit dem von der Hinterfläche allein zurückgesendeten intensiver gefärbten Lichte Veranlassung zu einer subjectiven Färbung gebe, wurde eine runde Oeffnung in einem Metallschirm in den Weg $o_{\text{I}}\, m_{\text{II}}$ der von dem farbigen Glase reflectirten Strahlen eingeschaltet, und die so beleuchtete Oeffnung durch ein doppelbrechendes achromatisches Prisma unter dem Polarisationswinkel betrachtet. Bei der Stellung des Prismas, wo das von der Vorderfläche gespiegelte Licht in dem einen Bilde verschwindet, erhält man hier nur Licht von der Hinterfläche, im andern Bilde hingegen Licht von der Vorder- und Hinterfläche. Bei Anwendung der verschiedenfarbigsten Gläser erschien doch nie eine subjective Färbung, stets nur ein Unterschied gröfserer Intensität der Farbe, die aber bei Beleuchtung durch blaues Himmelslicht sich dem entsprechend modificirte.

Um nun zu untersuchen, ob das von der Vorderfläche reflectirte Licht, verglichen mit dem von der Hinterfläche gespiegelten, Veranlassung zu subjectiver Farbe werde, wurde statt des undurchsichtigen Körpers $cd$ eine ihm entsprechende enge Spalte angewendet, durch welche das Licht einfiel, während alle übrigen Theile des Glases beschattet waren, d. h. $oo$ und $mm$ abgehalten. Man sieht nun an der Stelle $ab$ Licht allein von der Vorderfläche, an der Stelle $\alpha\beta$ Licht von der Hinterfläche, also jetzt bei $\alpha\beta$ dieselbe Erscheinung, als vorher bei $ab$ und umgekehrt. Die subjective Färbung des bei $ab$ reflectirten weifsen Lichtes ist noch vorhanden aber schwächer. Davon, dafs sie subjectiv sei, kann man sich überzeugen, wenn man verschiedenfarbige Gläser neben einander auf denselben Metallspiegel legt, und nun mittelst eines stark brechenden Prismas

Spectra durch die Bilder erzeugt. Während nämlich die durch Reflexion von der Hinterfläche bei $\alpha\beta$ erzeugten Spectra die gröfsten Differenzen zeigen, je nachdem nämlich die Enden des Spectrums durch Absorption angegriffen werden, oder bestimmte Stellen innerhalb derselben, giebt das von der Vorderfläche der verschiedenfarbigen Gläser bei $ab$ reflectirte Licht, so verschiedenfarbig es auch, direct gesehen, dem Auge erscheint, doch ganz übereinstimmende Spectra und zwar ohne Discontinuität.

Aus den angeführten Versuchen folgt also, dafs die Färbung des äufsern Bildes subjectiv sei, und zwar hervorgebracht durch das Zusammenwirken des Gegensatzes zu dem innern Bilde und zu dem Lichte, welches zugleich von Vorder- und Hinterfläche in das Auge gelangt.

## 2. Subjective Farbenerscheinungen bei einem Farbenkreisel und eine darauf gegründete Methode, seine Umdrehungsgeschwindigkeit zu bestimmen. (Pogg. Ann. 71 p. 112).

Bei dem Diploskop, welches Graf Schaffgotsch (Pogg. Ann. Bd. 54, S. 193) beschrieben hat, wird eine in der Mitte getheilte ruhende Scheibe, deren eine Hälfte roth, die andre grün gefärbt ist, durch zwei vor die Augen gehaltene Röhren so betrachtet, dafs das eine Auge nur rothes Licht erhält, das andre nur grünes, und zwar so lange, bis sich der Eindruck abstumpft. Setzt man dann die Scheibe in schnelle Drehung, so sieht das Auge, welches Roth betrachtet hatte, nur Grün, das, welches dem Grün zugewandt war, nur Roth. Für die beiden nach einander sich nun dem Auge darbietenden Eindrücke ist nämlich das Auge nicht mehr gleich empfänglich, abgestumpft für den einen, und, nach der Ansicht einiger Physiker, doppelt empfänglich für den Eindruck des Contrastes. Bei den folgenden Versuchen werden hingegen dem Auge zuerst zwei Farben dargeboten, dann wird einem Theile der Netzhaut plötzlich der Eindruck einer Farbe entzogen, und man sieht dann an dieser Stelle die andre Farbe in gröfster Lebhaftigkeit.

Auf einen schnell rotirenden Farbenkreisel wurde eine Scheibe gelegt, welche einen gelben und blauen Sector im Gröfsenverhältnifs von 1 : 4 enthielt, um ein in der Mitte stehendes Grün als Mittelfarbe zu geben. Ich bewegte nun ein dunkles Stäbchen von der Dicke eines dünnen Bleistifts über die in gleichförmiger Mischungsfarbe erscheinende Scheibe parallel mit sich selbst fort, und sah den Stab als ein Stabgitter mit abwechselnd blauen und gelben äufserst lebhaften gefärbten Speichen. Die gröfsere Breite der gelben Speichen zeigt sogleich, dafs wenn der Stab Blau verdeckt, man Gelb sieht, so wie er hingegen über Gelb gelangt, Blau. Mit zunehmender Geschwindigkeit der Fortbewegung des Stabes treten die Speichen weiter auseinander, welches ebenfalls eintritt, wenn bei gleichbleibendem Fortrücken des Stabes die Drehungsgeschwindigkeit des Kreisels abnimmt. Es ist nicht schwer, die Anzahl der Speichen zu zählen, und da diese so oft sich vervielfältigen als der Stab von einer Farbe zur andern übergeht, so giebt die Anzahl der blauen Speichen, wenn nur ein gelber Sector vorhanden ist, unmittelbar die Anzahl der Umdrehungen des Kreisels in einer gegebenen Zeit. Umgekehrt kann man aus der bekannten Rotationsgeschwindigkeit des Kreisels einen Rückschlufs machen auf die Geschwindigkeit eines geradlinig fortrückenden Körpers.

Der Grund für die Vervielfältigung des Stabes ist von Plateau aus dem Roget'schen Princip früher entwickelt worden, die Anwendung auf Farben, so viel ich weifs, noch nicht gemacht.

Die Wahl der Farben ist nicht gleichgültig, wie folgende Vergleichung zeigt:

Schwarzer Stab

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| orange blau | Mischung | roth | schwach | sichtbar |
| roth grün | - | braun | nicht | - |
| gelb roth | - | tief orange | gut | - |
| blau roth | - | blau | nicht | - |
| weifs schwarz | - | fast weifs | schwach | - |

Weifser Stab

| | | | |
|---|---|---|---|
| blau gelb | | schwach | sichtbar |
| schwarz weifs | | nicht | - |

| | | |
|---|---|---|
| blau roth | nicht | sichtbar |
| gelb roth | schwach | - |
| roth grün | nicht | - |
| blau orange | nicht | - |

Bei Schwarz und Weifs stört besonders das bei abnehmender Geschwindigkeit eintretende Flimmern.

Bewegt man den Stab vor einer, nach Fechner's Angabe (Ann., Bd. 45, S. 227, Taf. III, Fig. 7), spiralförmig mit zwei Farben bemalten rotirenden Scheibe vorbei, so scheinen die Speichen des erscheinenden Gitters vom Rande nach der Mitte zu sich büschelförmig zu erweitern.

Es ist klar, dafs ganz dieselbe Erscheinung sich zeigt, wenn man, während der unbewegte Stab vor der rotirenden sectorenweise bemalten Scheibe sich befindet, das Auge schnell zur Seite bewegt, als wenn bei ruhendem Auge der Stab parallel mit sich fortrückt. Ein solcher unbewegter Stab ist die senkrechte Achse des Kreisels. Bewegt man daher den Kopf rasch zur Seite, so sieht man die Achse des Kreisels ebenfalls als farbiges Stabgitter.

Auf einem andern Grund beruht folgende Erscheinung. Bewegt man vor einer rotirenden sectorenweise bemalten Scheibe, über welche kein Stift hervorragt, und welche man etwa aus der Entfernung von 5 Fufs betrachtet, das Auge schnell zur Seite, indem man mit dem Kopfe schüttelt, so sieht man die Mischungsfarbe auf der Seite der Scheibe, welche sich in demselben Sinne als der Kopf bewegt, in ihre Componenten auflösen, weil zwischen dem bewegten Auge und der rotirenden Scheibe zwar nicht relative Ruhe eintritt, doch eine Annäherung an dieselbe. Bei einer Scheibe, bei welcher drei gelbe Sectoren und drei blaue im Verhältnifs von 1 : 4 mit einander abwechselten, erschienen die Sectoren in der Weise verändert, als wenn man einen Viaduct sähe, dessen Bögen gelb angestrichen sind, während die Zwischenräume zwischen den Pfeilern tief blau erschienen. Im Gegensatz der gewöhnlichen Darstellungsart kann man dies eine subjective Focale nennen.

Auf solchen unbewufst erfolgenden schnellen Aenderungen der Sehrichtung beruht es wahrscheinlich, wenn man aus der

Mischungsfarbe einer rotirenden Scheibe mitunter plötzlich die componirenden Farben momentan hervorblitzen sieht.

## 3. Scheiben zur Darstellung subjectiver Farben [1]).

Die bekannte Erfahrung, dafs, wenn man ein farbiges, vor einen weifsen Grund gehaltenes Papier schnell vor diesem wegzieht, die bisher verdeckte Stelle in complementarer Färbung erscheint, hat mich zu der Construction von Scheiben geführt, welche die subjectiven Farben mit einer Lebhaftigkeit zeigen, welche jeden überraschen wird, der die damit anzustellenden Versuche zum erstenmal sieht. Sie sind vorzugsweise geeignet, einem grofsen Kreise von Zuhörern die Erscheinung zu zeigen.

Im 45. Bande von Pogg. Ann. p. 227 hat Fechner, um Abstufungen reinen Graus zu erhalten, Scheiben construirt, in welchen auf weifsem Grund eine schwarze Figur sich befindet, deren Umfang eine archimedische Spirale ist. Er bemerkte dabei subjective Farbenerscheinungen. Ich hatte zum Behuf meiner Versuche für einen Farbenkreisel mir ähnliche Scheiben construirt, in denen ganz auf dieselbe Weise, wie dort Weifs und Schwarz, complementare Farben aufgetragen waren. Die dabei hervortretenden Farben veranlafsten mich nun, die einzelnen Farben auf weifsem Grunde zu untersuchen.

Um die Erscheinung in einer lothrechten Ebene darzustellen, habe ich sie auf ein von Herrn Grüel angegebenes freistehendes Uhrwerk befestigt, welches in Figur 27 abgebildet ist. Die verschiedenen Scheiben werden bei *a* vermittelst einer Klemmschraube befestigt, und durch eine Klemmschraube bei *b* die Drehungsgeschwindigkeit geregelt. Man läfst zuerst die Scheibe eine längere Zeit schnell rotiren, so dafs sie gleichförmig gefärbt erscheint, und verlangsamt dann plötzlich die Bewegung, wo auf dem weifsen Grunde, besonders wenn man schief gegen die Scheibe blickt, die subjective Farbe in ungewöhnlicher Stärke hervortritt, besonders wenn die Scheibe sich so dreht, dafs die Spirale sich zu öffnen und dabei zu vergröfsern scheint.

[1]) Pogg. Ann. 75, p. 526.

Wenn man verschiedenen Individuen diese Versuche zeigt, so ist es höchst auffallend, wie die Augen derselben für einen bestimmten subjectiven Farbeneindruck besonders empfänglich sind, für einen andern weit weniger. Das Urtheil, bei welcher Farbe die complementare Färbung am lebhaftesten hervortritt, fällt daher, wenn viele die Versuche gleichzeitig sehen, äufserst verschieden aus. Auch ist die Drehungsgeschwindigkeit verschieden, sie ist für das Maximum der Wirkung bei den weniger empfänglichen Augen gröfser als bei den sehr empfänglichen.

Ich habe noch andre Scheiben construirt, welche ebenfalls die subjectiven Erscheinungen sehr schön zeigen. Auf schwarzem Grunde werden zwischen zwei concentrischen Kreisen, deren Mittelpunkt die Drehungsachse ist, Kreise gezeichnet, deren Durchmesser der Abstand derselben, und die, indem sie die concentrischen Kreise und sich selbst berühren, einen zusammenhängenden Ring bilden. Diese Kreise sind nun abwechselnd farbig und weifs. Bei schneller Drehung stellt sich das Ganze als ein gefärbter Ring dar, indem das beigemischte Weifs die Intensität des Farbeneindrucks vermindert. So wie aber die Drehung nachläfst, treten an den weifsen Kreisen die lebhaftesten subjectiven Farben hervor.

Dabei zeigt sich eine sehr merkwürdige optische Täuschung. Die Kreise erscheinen nämlich als schwache Ellipsen, deren Längenachse dem Drehungsmittelpunkt zugekehrt ist. Der Grund ist der: man glaubt auf dem gegebenen Raume mehr Kreise zu sehn, und sie erscheinen daher in der Richtung der Rotation schmaler.

Bei allen diesen Versuchen kommt es auf die Wahl der Farben sehr an, um die Erscheinung in grofser Deutlichkeit zu zeigen. Sind die Farben rein, so zeigen diese Scheiben, wenn man mehrere neben einander aufstellt, zugleich die Absorptionsphänomene in überraschender Deutlichkeit. Während z. B. eine lebhafte Farbe durch ein anders gefärbtes Glas gesehn, vollkommen schwarz wird, verschwindet hingegen die Spiralfigur vollständig auf dem weifsen Grunde, wenn man die Scheibe durch ein gleichgefärbtes Glas betrachtet. Man glaubt

nur eine weifse Scheibe zu sehen mit der Färbung, die das Glas dem weifsen Grund giebt.

Auf einem senkrechten Stativ, wie das Grüel'sche, kann man auch Weifs durch dioptrische Farben darstellen. Ich wählte drei lebhaft gefärbte kreisförmige Gläser, die sich genau zu einem schwachen Grau neutralisiren. Sie wurden in dem concentrischen Ring in 3 Löcher so eingefügt, dafs sie die Ecken eines gleichseitigen Dreiecks bildeten. Bei der Drehung der Scheibe sieht man beim Durchblicken eine weifse Fläche farblos.

## VI. Einzelne optische Notizen.

### 1. Versuche über Gitterfarben in Beziehung auf kleinere Höfe [1]).

Brewster und Frauenhofer haben Versuche angestellt, die Bildung kleinerer Höfe zu erläutern. Brewster benetzte eine Glastafel mit einigen Tropfen einer gesättigten Auflösung von Alaun, welche schnell zu kleinen, dem Auge kaum sichtbaren Octaëdern in verschiedenen Richtungen liegend krystallisirte. Hielt er diese Tafel an das Auge und sah durch dieselbe nach der Sonne oder nach einem Lichte, so beobachtete er drei Lichtkreise in verschiedenen Entfernungen vom leuchtenden Körper. Frauenhofer legte eine Menge runder Staniolblättchen von 0.007 franz. Zoll Durchmesser zwischen zwei Plangläser, stellte diese lothrecht vor das Objectiv eines achromatischen Fernrohrs, und sah die runde Oeffnung am Heliostat durch dieses Gitter mit drei Farbenringen umgeben, deren Halbmesser für Roth 3′ 15″, 5′ 58″, 8′ 41″ waren, deren Differenzen also constant sind, wie es für so kleine Winkel nach den Beugungsgesetzen sein mufs. Um zu untersuchen, ob Durchsichtigkeit der kleinen Objecte den Versuch abändere, wurden Glaskügelchen auf ein horizontales Planglas gestreut. Das von

[1]) Pogg. Ann. 26, p. 310.

der Oeffnung am Heliostat einfallende Licht ging, nachdem es von einem unter 45° geneigten Spiegel nach Oben reflectirt worden, durch das Planglas, und gelangte durch eine zweite Reflexion von einem dem ersten parallelen Spiegel in das Objectiv des horizontal liegenden Fernrohrs. Die Erscheinung war der vorigen ähnlich.

Wenn die Farben der kleineren Höfe Gitterfarben sind, so mufs man durch niedergeschlagenen Wasserdampf dieselben Erscheinungen hervorbringen können, als durch Gitter. Da aber die schönen Farbenringe, welche man um eine ferne Glasflamme sieht, wenn man diese durch ein beschlagenes Glas betrachtet, auch auf andre Weise als durch Beugung erklärt werden können, so müssen die Versuche so eingerichtet werden, dafs sie jede andre Erklärung ausschliefsen.

Ein quadratisches Glasgitter von 1140 Furchen auf den Pariser Zoll, wurde dicht vor das Objectiv eines achromatischen Taschenperspectivs gehalten, und mit diesem nach einer 30 bis mehrere Hundert Fufs entfernten Lichtflamme gesehen. Die durch die parallelen Streifen entstandenen Spectra erschienen einander allmählig übergreifend als farbiges Kreuz von der Breite des leuchtenden Objects. Die dem Objectiv zugekehrte nicht gefurchte Fläche wurde nun angehaucht und sogleich zeigte sich die glänzende Erscheinung, welche Frauenhofer auf der sechsten Tafel seiner Gitterversuche abgebildet hat, mit 4 bis 5 Reihen der characteristisch verzogenen Seitenspectra. Die Erscheinung blieb dieselbe, wenn die angehauchte Fläche dem Lichte zugekehrt wurde, die gefurchte dem Objectiv. Wurde hingegen die gefurchte Fläche angehaucht, so verschwanden nicht nur die Spectra zweiter Klasse, sondern auch das ursprüngliche Farbenkreuz wurde fast vollkommen verdeckt..

Um nun zu untersuchen, ob die verzogenen Spectra der zweiten Klasse durch die ungleiche Ablenkung der Farben der zuerst durch das Glasgitter entstandenen Spectra hervorgebracht würden, wurde einfarbiges Licht angewendet. Eine Weingeistlampe, deren Docht mit Salz eingerieben war, und die durch ein gleichseitiges Prisma von Guinandschem Flintglase betrachtet, einen sehr intensiv blauen und violetten Saum zeigte, wurde

durch ein braungelbes Glas monochromatisirt. Statt verzogener Seitenspectra erschienen nun beim Anhauchen Reihen von gleichweit von einander abstehenden gelblichen Lichtflammen, die regelmäfsige Quadrate bildeten. Eben solche Reihen rother Lichtflammen erschienen, wenn vor eine Gasflamme ein rothes Glas gehalten wurde. Bei einer Flamme endlich, welche aufser Gelb und Violett ein lebhaftes Grün im Spectrum zeigte, erschien das Grün weniger abgelenkt als das Gelb, während das Violett wegen Mangel an Helligkeit nicht bemerkt wurde. Ich glaube kaum hinzufügen zu dürfen, dafs die Gestalt des betrachteten Objects gleichgültig ist. Fällt das Licht durch eine runde Oeffnung, so sieht man bei einfarbigem Licht Kreise in den Ecken des Quadrats.

Hält man das quadratische Gitter unmittelbar vor das Auge ohne Fernrohr, so erscheint das Farbenkreuz sehr ausgedehnt. Dreht man das Gitter um einen der lothrechten Streifen, so dafs die Ebene des Gitters immer lothrecht bleibt, so krümmt sich der lothrechte Theil des Kreuzes. Dreht man es um einen horizontalen Streifen, so krümmt sich der horizontale. Die durch den Wasserdampf entstehenden Seitenspectra verhalten sich nun ebenso. Bei der ersten Drehung nämlich krümmen sich alle lothrechten Reihen, bei der zweiten alle horizontalen. Da sie den durch das Glasgitter entstandenen parallel bleiben, so ist dies ein neuer Beweis, dafs sie durch Ablenkung derselben hervorgebracht werden.

Bei dem allmähligen Verschwinden des niedergeschlagenen Wasserdampfes werden die ihn bildenden Wassertröpfchen kleiner, ohne dafs ihr Abstand sich ändert, wovon man sich durch Beobachtung unter einem Mikroskop überzeugen kann. Der Ort, wo man durch Gitter eine bestimmte Farbe sieht hängt nicht von der Gröfse der Zwischenräume ab, auch nicht von der Breite der Furchen, sondern von der Summe beider. Da diese hier unverändert bleibt, so ist klar, dafs die Spectra ihre Stelle behalten müssen, wenn der Wasserdampf allmählig verschwindet. Man sieht sie auch wirklich an derselben Stelle verlöschen, an welcher sie bei dem Anhauchen sich bildeten.

Da man also durch Combination von einem Glasgitter und

Wasserdampf dieselben Erscheinungen wahrnimmt, als durch Combination mehrerer Gitter unter einander, so zeigt dies, dafs die durch den Wasserdampf allein entstehenden Farben Gitterfarben sind.

Bedingung zum Gelingen des Versuches scheint zu sein, dafs die auf einander senkrechten Striche des quadratischen Gitters sich in einer Ebene befinden, denn als zwei aus 1000 parallelen Strichen auf den Zoll bestehende Gitter mit ihren gefurchten Flächen so an einander gelegt wurden, dafs sie zusammen ein quadratisches Gitter bildeten, erschienen beim Anhauchen der Aufsenfläche keine Seitenspectra, welche aber sogleich mit einem Glasgitter wahrgenommen wurden, welche bei gleichem Abstand der Flächen die auf einander senkrechten Striche in derselben Ebene, nämlich seiner Oberfläche, enthielt.

Die Dicke der Gläser, auf welche diese drei Gitter eingerissen waren, betrug 4 Millimeter, die Platte des Gitters mit 1140 Furchen war 2, 5 Millimeter.

## 2. Beschreibung eines Stephanoskop.

Bei der grofsen Schwierigkeit, concentrische Kreislinien mit einem Diamant in hinlänglicher Schärfe und Gleichförmigkeit auf Glas zu ziehen, werden auf diese Weise construirte Stephanoskope immer mangelhaft. Man erhält die Höfe hingegen in gröfster Reinheit, wenn man ein aus parallelen kurzen geraden Linien (1200 auf den Zoll) bestehendes stark irisirendes Gitter, wie sie Herr Oertling verfertigt, rasch in seiner Ebene dreht, und durch das rotirende Gitter nach einer kleinen hell beleuchteten Oeffnung sieht. Man erhält in weifser Beleuchtung deutlich acht rothe Ringe.

## 3. Optische Täuschung bei dem Fahren auf der Eisenbahn.

Es ist eine bekannte Erfahrung, dafs die, welche zum ersten Male auf einer Eisenbahn fahren, in der Regel darüber erstaunen, wie klein die Gegenstände, bei denen sie vorbei-

fahren, z. B. Menschen, Pferde, Gesträuche erscheinen. Der Grund dieser Erscheinung liegt gewifs darin, dafs man die ungewohnte Geschwindigkeit des Fortrückens in horizontaler Richtung mit der Vorstellung über die Höhe der Gegenstände combinirt, und diese daher als zu klein beurtheilt. Vor einigen Jahren hatte ich Gelegenheit, die umgekehrte Beobachtung zu machen. Ich fuhr durch ziemlich enge Durchschnitte des Kohlengebirges in einem grofsen Wagen, der nicht in Coupés abgetheilt war. Nachdem ich die Augen lange auf die schnell vorüberfliegenden Gebirgswände gerichtet hatte, wandte ich sie zurück auf die Innenseite des Wagens, der nun, indem ich zugleich noch die Wände im Auge behielt, den Eindruck eines hohen, mit gewölbtem Dache versehenen Saales machte. Die Ableitung dieser Täuschung aus demselben Princip bietet sich von selbst dar.

## 4. Methode, die Absorption des Lichtes in farbigen Flüssigkeiten mit zunehmender Dicke derselben zu untersuchen [1]).

Bei den Untersuchungen der Absorptionserscheinungen in farbigen Flüssigkeiten bedient man sich, um verschiedene Dicken derselben zu erhalten, in der Regel eines durchbohrten massiven Glasprismas mit an die Seiten desselben angelegten Spiegelscheiben. Da aber bei manchen Erscheinungen es wünschenswerth ist, die absorbirende Wirkung ohne Erzeugung prismatischer Farben zu erhalten, das Zusammenschieben zweier gleichen Keile aber wegen der vielfachen Spiegelungen Schwierigkeiten darbietet, so erscheint das folgende Verfahren mir in Untersuchungen der Art Vorzüge zu gewähren, weil man die Schichten der Flüssigkeit begrenzt erhält durch Ebenen, welche in mathematischer Strenge parallel sind. Man gieſst Quecksilber in ein weites Gefäfs und darüber die zu untersuchende Flüssigkeit. Schafft man nun vermittelst einer polarisirenden Vorrichtung

[1]) Pogg. Ann. 45, 162.

das von der Vorderfläche gespiegelte Licht hinweg, so erhält man das Licht in der Weise, als wenn es eine Planscheibe von entsprechender Dicke durchdrungen hätte, die man durch weiteres Aufgieſsen beliebig verändern kann. Ueberhaupt kann auf diese Weise bei vielen Versuchen ein belegter Glasspiegel die Stelle eines Metallspiegels vertreten.

# Nachweis der Figuren.

## Tafel I.

Figur 1. Spiegelprisma p. 190.
- 2. Stereoskop mit einem Prisma und einer Zeichnung p. 193.
- 3. Stereoskop mit zwei Prismen und zwei Zeichnungen p. 193.
- 4. Stereoskop mit einem Spiegel und zwei Zeichnungen p. 196.
- 5. Drehung des Bildes bei der Drehung eines Reversionsprisma p. 198.
- 6 u. 7. Reversionsprisma p. 198.
- 8. Polarisationsapparat p. 202.
- 9. Die polarisirende Vorrichtung desselben p. 203.
- 10. Die analysirende Vorrichtung desselben p. 204.
- 13. Die analysirende durch Spiegelung p. 206.
- 15. Apparat um verschieden polarisirtes Licht zu erhalten p. 241.
- 16. Gekühltes Glas zur Circularpolarisation p. 229.

## Tafel II.

Fig. 11. Rotirender Polarisationsapparat p. 212.
- 12. Krystallhalter für zweiachsige Krystalle p. 205.
- 14. Metallspiegel zur elliptischen Polarisation p. 210.
- 17. Links drehende Bergkrystalle p. 248.
- 18. Rechts drehende Bergkrystalle p. 248.
- 19. Links und rechts drehende Bergkrystalle p. 249.

Fig. 17a, 18b, 20, 21, 23, 23a, 23b. Farbenerscheinungen im Bergkrystall p. 249 — 251.

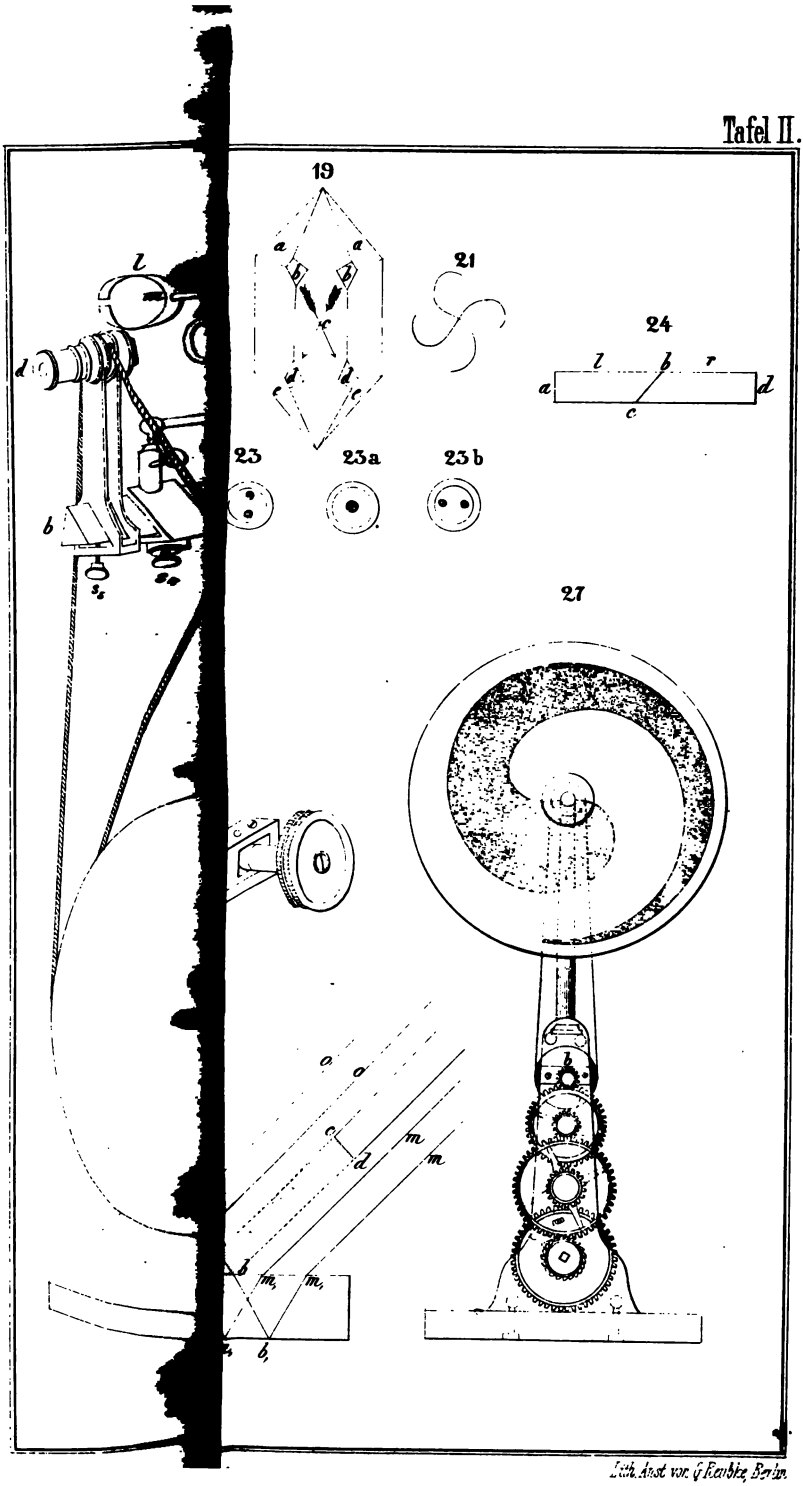
- 24. Nachbildung rechts und links drehender Platten von Soleil p. 259.
- 25. Depolarisator p. 262.
- 26. Doppelbilder auf farbigen Gläsern p. 274.
- 27. Farbenscheiben zur Darstellung subjectiver Farben p. 281.

# Namenregister zur Farbenlehre.


Airy 129. 130.
d'Alembert 31.
Arago 56 — 81.
d'Arcy 129.
Babinet 54.
Berthollet 9.
Biot 44. 111. 133. 134.
Bradley 4.
Breguet 83.
Brewster 14. 25. 54. 104. 106. 111. 121. 135.
Broch 133.
Cartesius 3.
Castel 30.
Cauchy 39.
Chaulness, Herzog von, 54.
Chladni 66.
Despretz 89.
Ettingshausen 53.
Euler 6.
Faraday 72. 134.
Fizeau 83.
Foucault 81.
Frauenhofer 11. 32. 37. 39. 55. 75. 140. 154.
Fresnel 8. 9. 52. 113. 127. 134.
Goethe 15. 29. 39. 49. 123. 132. 139. 142.
s'Gravesand 9.
Grimaldi 7. 47.
Guérard 98.
Haidinger 109.
Haldat 10.
Hamilton 113.
Hassenfratz 156.
Hegel 123. 145. 146.
Helmholtz 26.
Herschel 104. 148.
Hooke 51.
Hopkins 62.
Huyghens 6. 94. 112.
Kane 63.
Lamé 14.
Lambert 31. 139.
Lloyd 53. 113.
Malus 9. 95.
Marat 140.
Mayer, Tobias 31.
Mitschel 10.
Mitscherlich 112.

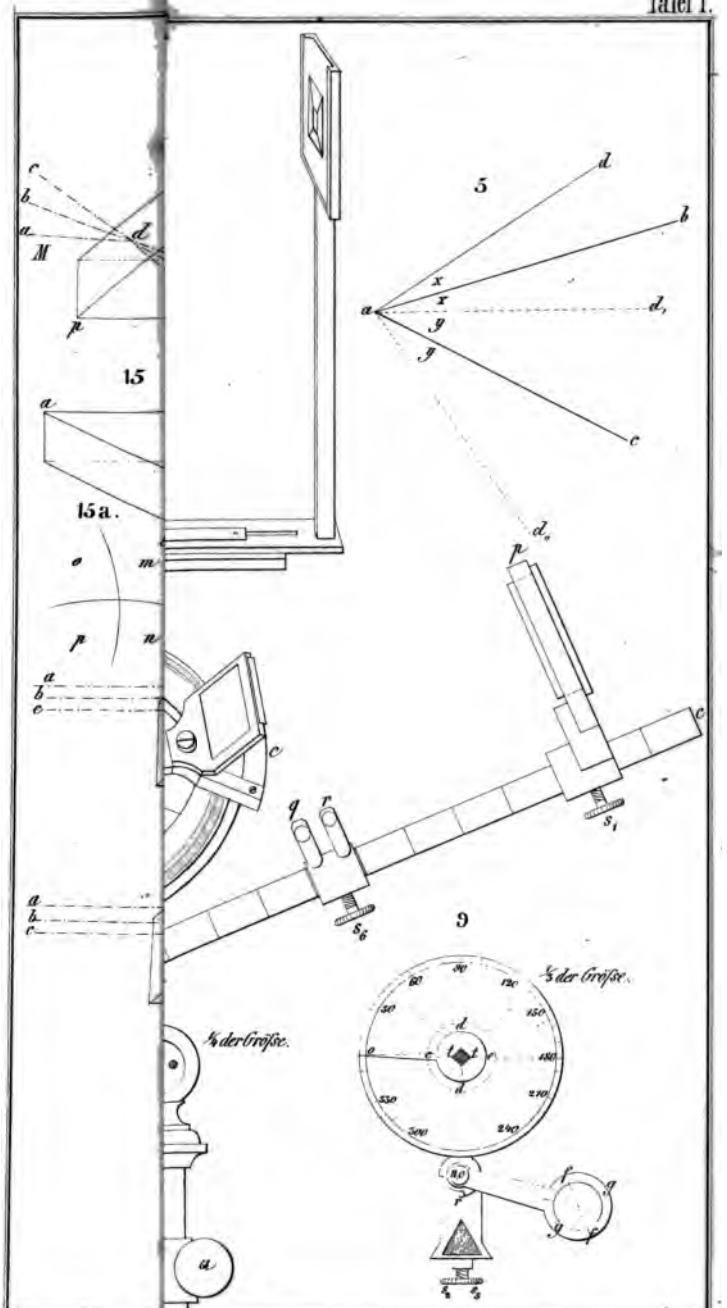
Mushenbroek 87.
Neumann 122.
Newton 7. 32. 33. 44. 46. 49. 54. 136.
Nicol 97.
Nobili 54.
Nörrenberg 122.
Paris 70.
Plateau 72.
Pouillet 54.
Prevost 27.
Rochon 32.
Roemer 3.
Roget 72.
Savart 112.
Scheibler 62. 64.
Schiffermüller 30.
Schwerd 55.
Seebeck 111. 134. 157.
Snellius 8.
Soleil 104.
Vieth 62.
Vinci, Leonardo da, 30.
Weber 59. 62.
Wheatstone 67. 155.
Wrede 39.
Young, Thomas, 34. 48. 50.

BERLIN, DRUCK VON GUSTAV SCHADE,
Oranienburgerstr. 27.




Lith. Anst. von G. Reinbke, Berlin.

Tafel I.




Lith. Anst. von G. Reuß, Berlin.

# Schriften,

welche im Verlage von G. W. F. Müller in Berlin
(Geschäftslocal: Unter den Linden 23, Privatwohnung: Bendlerstraße 37)
erscheinen und durch alle Buchhandlungen zu beziehen sind:

## Der Baum.

### Studien aus dem Pflanzenleben.

Mit acht Lithographien, worunter vier in Farbendruck, und mit vielen in den Text eingedruckten Holzschnitten

von

**Dr. Hermann Schacht,**

Ordentliches Mitglied der naturwissenschaftlichen Gesellschaft zu Hamburg; Ehrenmitglied der Gesellschaft naturforschender Freunde zu Berlin, des [illegible]-Vereins zu Hamburg, des naturwissenschaftlichen Vereins der bayrischen Pfalz; correspondirendes [illegible] Mitglied der botanischen Gesellschaft zu Regensburg, der Senkenbergischen naturforschenden Gesellschaft zu Frankfurt a. M. und der Société des sciences naturelles de [illegible]bourg.

gr. 8. br. (24—26 Bog.) 1853. Preis [illegible] 3 ¼ bis 3 ½ Thlr.

**Inhalt.**

1. Der innere Bau und das Leben der Gewächse. — 2. Der Pflanzenkeim und die junge Pflanze. — 3. Die Stammknospe und die Wurzelknospe. — 4. Der Stamm und die Zweige. — 5. Das Blatt. — 6. Die Wurzel. — 7. Das Holz und die Rinde. — 8. Die Blüthe und die Frucht. — 9. Der Baum und sein Leben. — 10. Der Wald und sein Leben. — 11. Der Wald und seine Bedeutung. — 12. Die Gesetzmäßigkeit in der Natur.

## Die Prüfung
## der im Handel vorkommenden Gewebe

### durch das Mikroskop und durch chemische Reagentien.

Mit acht lithographirten Tafeln

von

**Dr. Hermann Schacht.**

gr. 8. (4 ¼ Bog. Text) 1853. Preis n. 1 ¼ Thlr.

**Inhalt.**

1. Der Gebrauch des Mikroskopes zur Prüfung der Gewebefasern. — 2. Die bisherigen Prüfungsmethoden zur Unterscheidung der Gewebe des Handels. — 3. Die Arten der zum Verspinnen benutzten Fäden und ihre Eigenschaften. — 4. Prüfung der Leinwand. — 5. Prüfung des Papieres. — 6. Prüfung des Wollengarns und der Wollengewebe auf eine Beimischung von Baumwolle. — 7. Prüfung des Seidenfadens oder der seidenen Gewebe auf Beimischung von Wolle oder Baumwolle. — 8. Bemerkungen über einige im Handel vorkommende Bastzellen.

# DAS MIKROSKOP

und

## seine Anwendung

**insbesondere für Pflanzen-Anatomie und Physiologie.**

Mit sechs lithographirten Tafeln

von

Dr. Hermann Schacht.

gr. 8. br. (12 Bogen Text.) 1851.

Preis n. 1⅔ Thlr.

**Physiologische Botanik.**

# DIE PFLANZENZELLE

**der innere Bau**

## und das Leben der Gewächse.

Für Botaniker, Anatomen, Chemiker, Forst- und Landwirthe, sowie für Naturkundige überhaupt.

Nach

**eigenen vergleichenden, mikroskopisch-chemischen Untersuchungen**

bearbeitet

von

Dr. Hermann Schacht.

Mit 390 mikroskopischen Abbildungen auf 20 Tafeln, deren 9 in Farbendruck.

gr. Lex.-Form. carton. (30 Bog. oder 60 Bog. kl. 4.)

Preis n. 6 Thlr. 20 Sgr.

**Inhalt.**

§. 1. Einleitende Bemerkungen. — §. 2. Die Methode der Untersuchungen. — §. 3. Die chemischen Grundstoffe. — §. 4. Die Zellenmembran. — §. 5. Das Protoplasma. — §. 6. Der Zellenkern. — §. 7. Der Primordialschlauch. — §. 8. Der Zellsaft und die in ihm enthaltenen Stoffe. — §. 9. Das Entstehen der Pflanzenzelle. — §. 10. Zellenbildung ohne Theilung des Primordialschlauches. — §. 11. Zellenbildung mit Theilung des Primordialschlauches. — §. 12. Das Wachsthum der Zellenmembran. — §. 13. Die Pflanzenzellen mit einander verbunden. — §. 14. Die Interzellularsubstanz. — §. 15. Das Interzellularsystem. — §. 16. Die Cuticula. — §. 17. Die Arten der Pflanzenzellen. — §. 18. Die Schwärmfäden der Kryptogamen. — §. 19. Die Sporen der Kryptogamen. — §. 20. Die Pollen-

körner oder der Blüthenstaub der Phanerogamen. — §. 21. Die Zellen und das Gewebe der Pilze und Flechten. — §. 22. Die Zellen und das Gewebe der Algen. — §. 23. Das Parenchym und seine Zellen. — §. 24. Das Cambium und seine Zellen. — §. 25. Die Gefäße der Pflanzen. — § 26. Das Holz und seine Zellen. — §. 27. Die Bastzellen. — §. 28. Die Oberhaut der Gewächse. — §. 29. Die Spaltöffnung. — §. 30. Die appendiculären Organe der Oberhaut. — §. 32. Der Verdickungsring. — §. 33. Die Gefäßbündel im Allgemeinen. — §. 34. Die Gefäßbündel der Kryptogamen. — §. 35. Die Gefäßbündel der Monocotyledonen. — §. 36. Das Gefäßbündel der Dicotyledonen. — §. 37. Stamm, Blatt, Wurzel, Knospe, Blüthe. — §. 38. Das Wachsthum der Pflanzen. — §. 39. Das Wachsthum der höheren Kryptogamen. — §. 40. Das Wachsthum der Monocotyledonen. — §. 41. Das Wachsthum der Dicotyledonen. — §. 42. Die Bewegung der Protoplasma. — §. 43. Die Aufnahme der Stoffe und die Wege der Saftführung. — §. 44. Die Verarbeitung der aufgenommenen Stoffe durch die Pflanzenzelle. — §. 45. Die Resorption. — §. 46. Die Secretion. — §. 47. Die Fortpflanzung durch Brutzellen. — §. 48. Die Fortpflanzung durch Sporen. — §. 49. Die Fortpflanzung durch Pollenschlauch und Embryosack. — §. 50. Der Tod der Pflanzenzelle. — Anhang, die Anwendung der Polarisation auf die Pflanzenzelle betreffend. — Tabellarische Uebersicht der Anatomie des Holzes einiger Coniferen. — Zusätze und Verbesserungen. — Erklärung der Abbildungen. — Alphabetisches Sachregister. — Alphabetisches Pflanzennamenregister. — Alphabetisches Figurenregister.

# Untersuchungen

über den

# Bau und die Entwicklung der Baumrinde.

Von

**Dr. Johannes Hanstein.**

Mit acht lithographirten Tafeln.

gr. 8. br. (7¼ Bogen Text.) 1853.

Preis n. 1¼ Thlr.

**Inhalt.**

I. Allgemeines. — 1. Uebersicht der Rindenschichten. — 2. Erste Entwicklung derselben. — 3. Epidermis und Peridermа. — 4. Das primäre Rindenparenchym. — 5. Die secundäre Rinde. — 6. Die Bildung der Borke. — II. Besonderes. — Charakteristik einzelner Rindenarten als Beispiele: 1. Bäume mit Peridermrinde aus den Gattungen: Fagus, Viburnum, Acer, Ulmus. — 2. Bäume mit Schuppenborke aus den Gattungen: Tilia, Juglans, Populus, Quercus, Ulmus, Robinia, Syringa, Sambucus, Acer, Platanus, Betula. — 3. Gehölze mit Ringelborke aus den Gattungen: Ribes, Vitis, Caprifolium, Clematis, Melaleuca. — III. Gesammtergebniß. — Kurze Zusammenfassung der aus den Beobachtungen gesammelten Resultate nebst Folgerungen für die Bedeutung der Rindentheile.

# Die Chemie

## in technischer Beziehung.

Von

Prof. Dr. Friedrich Köhler.

**Sechste umgearbeitete und sehr erweiterte Auflage.**

gr. 8. (39 ½ Bog.) 1849.

Preis n. 2 ⅔ Thlr.

# UNTERSUCHUNGEN

über

# DIE BRANDPILZE

und die durch sie verursachten

## Krankheiten der Pflanzen

**mit Rücksicht auf das Getreide und andere Nutzpflanzen.**

Von

Anton de Bary.

med. dr.

Mit acht lithographirten Tafeln.

gr. 8. br. (9 ¼ Bogen Text.) 1853. Preis n. 1 ⅓ Thlr.

## Portrait Prof. Dr. H. W. Dove's.

gr. fol. Preis n. 1 Thlr.

Es ist dies Portrait das ähnlichste bis jetzt erschienene und befriedigt allgemein.